

Ein Beitrag zur interaktiven Datenaufbereitung
bei Strukturberechnungen nach der
Methode der finiten Elemente
Mit einer Anwendung aus dem Flugzeugbau

Doktorarbeit
zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der
Abteilung für Bauingenieurwesen
der Ruhr-Universität Bochum

von
Wilfried Lehnert
Braunsdorf / Kr. Jägerndorf

Bochum 1977

Doktorarbeit eingereicht am: 5. Mai 1976

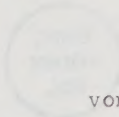
Tag der mündlichen Prüfung: 28. November 1977

Berichter: Prof. Dr.-Ing. H. Fleßner

Prof. Dr.-Ing. K. H. Schrader

Ein Beitrag zur interaktiven Datenaufbereitung
bei Strukturberechnungen nach der
Methode der finiten Elemente
Mit einer Anwendung aus dem Flugzeugbau

Doktorarbeit
zur
Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
der
Abteilung für Bauingenieurwesen
der Ruhr-Universität Bochum



von

Wilfried Lehnert
Braunsdorf / Kr. Jägerndorf

Bochum 1977



Inhaltsverzeichnis

Seite

Persönliches Vorwort

1. Allgemeines	5
1.1 Einleitung und Aufgabenstellung	
1.2 Bisher bekannte Entwicklungen	
Bemerkungen zur Schreibweise	
2. Probleme bei der Datenaufbereitung	12
bei Finite-Element-Rechnungen	
2.1 Herkömmliche Datenaufbereitung	
2.2 Vorgeschlagene interaktive Datenaufbereitung	
3. Aufbau eines dialogfähigen Gesamtsystems	28
3.1 Gerätekonfiguration	
3.1.1 Rechenanlage	
3.1.2 Digitalisiergerät	
3.1.3 Bildschirmgerät	
3.2 Programmentwurf	
3.2.1 On line Betrieb	
3.2.2 Off line Betrieb	
4. Die Menüfeldtechnik	35
4.1 Menüfelder für Digitalisiergeräte	
4.2 Menüfelder für Bildschirmgeräte	
5. Interpretationsprogramm im off line Betrieb	38
6. Das interaktive Bildschirmprogramm	39
6.1 Programmstruktur	
6.2 Generierungsprogramme	
6.3 Programme für die Arbeitsvorgabe	
7. Generieren von Knotenpunktkoordinaten	42
7.1 Einsatz des Digitalisiergerätes	
7.1.1 Gestaltung eines Menüfeldes für	
die Koordinatenerfassung	
7.1.2 Koordinatensysteme und Zuordnungs-	
matrizen	

7.1.3 Manipulationen mit Koordinaten	
7.1.4 Gerätesteuerung	
7.2 Einsatz des aktiven Bildschirmgerätes	50
7.2.1 Allg. Bemerkungen zu geometrischen Gebilden	
7.2.2 Standard-Geometrieprogramme	
7.2.3 Das isoparametrische Konzept	
7.2.4 Hierarchie der Geometrieprogramme	
7.2.5 Datenorganisation bei der Punkt- generierung	
7.2.6 Der Generierungsprozeß	
8. Generieren von finiten Elementen	58
8.1 Repräsentation von Spannungszuständen	
8.2 Auswahl von Standard-Elementtypen	
8.3 Integration anderer Elementtypen	
8.4 Der Generierungsprozeß	
8.5 Zuweisen von Querschnittswerten	
9. Optimieren der Bandstruktur der Gesamt- steifigkeitsmatrix	66
10. Anwendungsbeispiele	69
10.1 Heißauge	
10.2 Teilstruktur mit Handloch	
11. Zusammenfassung	74
Literaturverzeichnis	76
Abbildungen	80
Lebenslauf	

Persönliches Vorwort

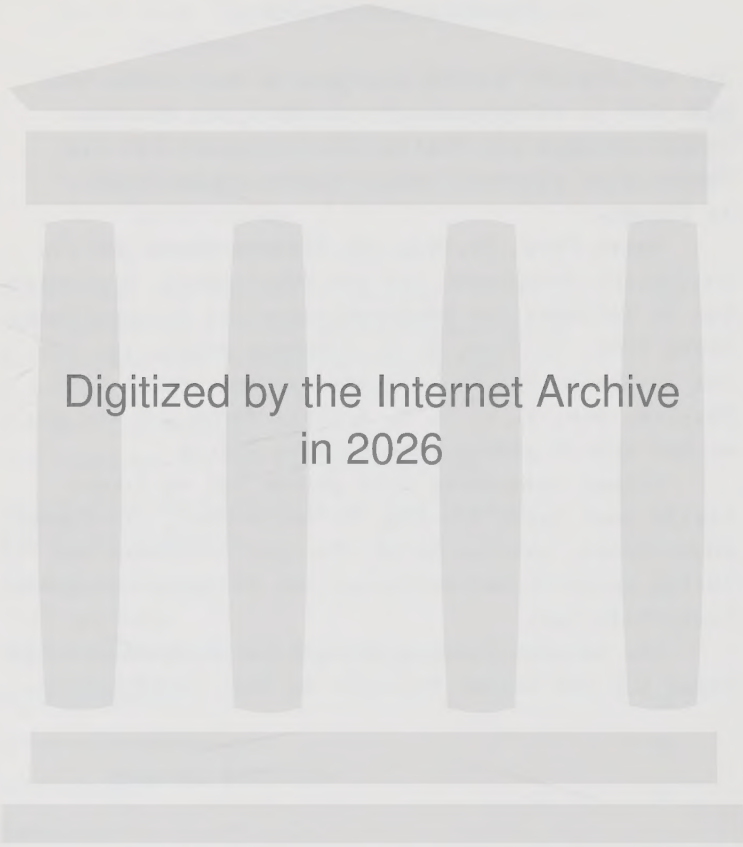
Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1972 bis 1975 im Rahmen meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur für Statik und Festigkeit bei den Vereinigten Flugtechnischen Werken-Fokker GmbH in Bremen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Fleßner danke ich für zahlreiche Anregungen und die Möglichkeit, Testarbeiten am Interaktiven Konstruktionsplatz durchzuführen. Herrn Prof. Dr.-Ing. K. H. Schrader möchte ich für die Übernahme des Korreferates danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Drs. h. c. J. H. Argyris danke ich für die an der Arbeit geübte konstruktive Kritik.

Meinen besonderen Dank möchte ich an dieser Stelle auch Herrn Dr.-Ing. R. Meyer-Jens, VFW-Fokker, aussprechen, welcher durch stetiges Interesse und vielfältig gewährte Unterstützung den Fortgang der Arbeit beeinflusst hat.

Für manchen Hinweis während der Programmierungsphase bin ich meinen Kollegen zu Dank verpflichtet.

Wilfried Lehnert



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546603_0029

1. Allgemeines

1.1 Einleitung und Aufgabenstellung

Programmierte Rechenverfahren, die auf der Methode der finiten Elemente basieren, gehören heute zu den anerkannten und bewährten Hilfsmitteln der Berechnungsingenieure in unterschiedlichen Arbeitsbereichen. Sowohl die Verschiebungsmethode als auch das Kraftgrößenverfahren sind für die Bearbeitung und Lösung von Problemstellungen, bei denen geschlossene Lösungsansätze nicht mehr zum Ziel führen, geeignet. Verschieden Gesichtspunkte, z. T. auch seitens der Datenverarbeitung haben die Verschiebungsmethode als einfacher formulierbar und damit bequemer und übersichtlicher programmierbar herausgestellt. Diese Methode hat sich somit auch bei den Anwendern gegenüber dem Kraftgrößenverfahren durchgesetzt, was sich nicht zuletzt an der großen Anzahl von bestehenden Programmen, basierend auf der Verschiebungsmethode, ablesen läßt.

Die Verschiebungsmethode wurde insbesondere auch im Hinblick auf die programmtechnische Realisierung von Argyris ⁽¹⁾ wesentlich gefördert und weiterentwickelt. Neben den großen Programmsystemen wie etwa ASKA ⁽²⁾, NASTRAN ⁽³⁾, ICES ⁽⁴⁾ um nur einige zu nennen, werden aber ebenfalls viele kleinere, nicht so umfangreiche FEM-Programme von den Berechnungsingenieuren zur Problemlösung herangezogen. Dieses sind dann oft von den Anwendern selbst entwickelte oder weiterentwickelte Systeme mit anwenderspezifischen Ein- und Ausgabevorschriften. In vielen Fällen steht schon beim Einsatz dieser Berechnungsprogramme dem mathematisch ausgefeilten Rechenablauf und Verarbeitungsprozeß der zum Teil sehr hohe manuelle Arbeitsaufwand sowohl bei der Erstellung der erforderlichen Eingabedaten als auch bei der Auswertung der in großer Zahl anfallenden Berechnungsergebnisse gegenüber.

Insbesondere in der gesamten Phase der Datenaufbereitung werden der Rechner sowie verfügbare periphere Geräte in vielen Fällen noch nicht in vollem Umfang zur Unterstützung des Berechnungsingenieurs herangezogen. Dadurch entsteht vor dem eigentlichen Verarbeitungsprozeß im FEM-Programm eine Bearbeitungsphase, in welcher die manuell zu erledigenden Routinetätigkeiten mit ihren Fehlerquellen überwiegen.

In der vorliegenden Arbeit wird für diesen Arbeitsabschnitt ein allgemeines Verfahren zur interaktiven Datenaufbereitung konzipiert und für eine bestehende Gerätekongfiguration realisiert.

Dazu wird der herkömmliche Vorgang der Datenaufbereitung hinsichtlich der Routinetätigkeiten und Fehlerquellen kurz untersucht. Gleichzeitig wird die für den späteren Entwurf des Programmsystems notwendige Festlegung der Datengruppen durchgeführt.

Anschließend wird eine für diese Form der Datenaufbereitung geeignete Gerätekongfiguration definiert und zusammen mit dem Konzept der interaktiven Datenaufbereitung vorgestellt. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Datenaufbereitung aus einem kreativen Anteil und aus dem Anteil der Routinetätigkeiten besteht. Sämtliche Routinetätigkeiten sollen nun in den Rechner verlagert werden und von ihm auf Veranlassung des Bearbeiters ausgeführt werden. Der Bearbeiter selbst steuert nur noch durch einen kreativen Dialog mit dem Rechner den gesamten Prozeß der Datenaufbereitung.

Das Verfahren wird realisiert, indem

- den dialogfähigen Geräten unterschiedliche Aufgaben im Prozeß zugeordnet werden

- zur Bewältigung dieser Aufgaben
Programmpakete entwickelt werden
- und schließlich in diesen Programm-
paketen Programmteile für den kreativen
Dialog bereitgestellt, sowie für die
Übernahme der Routinetätigkeiten
entwickelt werden.

1.2 Bisher bekannte Entwicklungen

Aus der Literatur sind verschiedene Entwicklungen, welche die Rechnerunterstützung in Teilbereichen der Datenaufbereitung behandeln, bekannt.

So schlagen Kamel und Eisenstein (5) eine Generierungssystematik vor, die auf vollständigen Polynomen beruht. Neben Linienelementen können auch flächige Elemente und Volumenelemente generiert werden. Der Netzgenerator, der im Stapelbetrieb eingesetzt wird, erwartet vom Benutzer die genaue Spezifikation des Bereiches in Form der Koordinaten der Berandungspunkte. Diese Vorgabedaten müssen manuell erstellt werden, da Digitalisiergeräte oder ein Bildschirm nicht zum Einsatz kommen. Da die Generierung des Netzes zunächst ohne Rücksicht auf die Reihenfolge oder Numerierung der Knotenpunkte erfolgt, wird eine anschließende Optimierung der Bandstruktur der Gesamtsteifigkeitsmatrix empfohlen.

Die von Frederick, Edge und Wong (6) erzielte Reduktion der manuellen Tätigkeiten besteht darin, daß die Koordinaten der Strukturknotenpunkte automatisch beim Anfahren mit dem Digitalisierstift aufgenommen werden. Zuvor müssen allerdings sämtliche Knotenpunkte auf der Zeichnungsvorlage markiert worden sein. Die Abtastreihenfolge ist für die Bandstruktur der Steifigkeitsmatrix entscheidend. Das Elementnetz, bestehend aus Dreieckselementen, wird in einem nachgeschalteten Netzgenerator erzeugt und kann für Kontroll- und Dokumentationszwecke auf einem Plotter ausgegeben werden. Müssen nachträglich Korrekturen am Netz vorgenommen werden, geschieht dieses durch Vorgabe der neuen Datenkarten.

Boisserie (7) stellt ein Programmsystem vor, das ausgehend von den geometrischen und physikalischen Randbedingungen ein komplettes Elementnetz erzeugt. Die Art der Interpolationspolynome, die zur Berechnung der Knoten-

punkte und der Elementsteifigkeitsmatrizen erforderlich sind, kann dabei vom Benutzer selbst vorgegeben werden. Es besteht die Möglichkeit, nach Lagrange über äquidistante Intervalle zu interpolieren oder orthogonale Funktionen mit beliebiger Intervallteilung zu benutzen.

Zienkiewicz und Phillips ⁽⁸⁾ präsentieren einen Netzgenerator für ebene und gekrümmte Oberflächen. Zunächst wird eine Grobeinteilung des gesamten Tragwerks in Bereiche mit i. a. vier Randlinien vorgenommen. Diese Einteilung richtet sich nach den geometrischen Gegebenheiten und den etwa vorhandenen bereichsweise unterschiedlichen Werkstoffdaten. Für jeden Bereich wird ein gekrümmtes Koordinatensystem aufgespannt, in welchem die Koordinaten der Knotenpunkte im Bereichsinnern und auf den zugehörigen Randlinien berechnet werden. Das Netz wird anschließend aus diesen Knotenpunkten aufgebaut. Das fertige Elementnetz kann auf einem Plotter ausgegeben werden.

Fleßner ⁽⁹⁾ schlägt einen Arbeitsplatz für den Konstrukteur und Berechnungsingenieur vor, bestehend aus Digitalisiergerät und graphischem Bildschirm mit Kleinrechner und der Möglichkeit des on line Anschlusses an einen Großrechner. Die konstruktive und berechnende Tätigkeit des Bauingenieurs, für ihn ist der Arbeitsplatz zunächst konzipiert, wird am Digitalisiergerät ausgeführt und der Bildschirm übernimmt vorerst nur Kontrollfunktionen. Wesentlich hierbei ist, daß die bekannte Menüfeldtechnik in einer allgemeinen Form für Digitalisiergeräte erweitert wird und Algorithmen geschaffen werden, die einen Dialog und die Eingabe beliebiger Symbole auf der Basis eines variierbaren Rasters erlauben.

Grieger ⁽¹⁰⁾ sieht im aktiven Bildschirmgerät ein geeignetes Instrument, den Berechnungsingenieur bei der Tragwerksberechnung zu unterstützen. Er erstellt ein allgemeines Programmsystem für die Überprüfung und Korrektur von Eingabedaten für eine FEH-Rechnung. Alle Daten werden

von einem externen Datenträger übernommen und nach dem Kontrollvorgang nach dort wieder zurück transferiert.

Für ebene, einfach zusammenhängende Bereiche haben Gordon und Hall ⁽¹¹⁾ ein Generierungsverfahren entwickelt. Durch eine Transformation auf den Einheitskreis können sowohl die Randlinien eines Bereichs als auch das Bereichsinnere durch Knotenpunkte, deren Koordinaten auf ein gekrümmtes Koordinatensystem bezogen sind, beschrieben werden.

Ein umfangreiches Bildschirmprogramm zur Überprüfung und Korrektur von Eingabedaten wird von Bousquet und Yates ⁽¹²⁾ vorgestellt. Vorprogramme erzeugen im Stapelbetrieb Elementnetze und legen sie auf einer Datei ab. Eine erste Kontrolle erfolgt am Bildschirm. Fehlerhafte Knotenpunkte und falsch platzierte Elemente können dort direkt korrigiert werden.

Alle vorgestellten Netzgeneratoren werden im Stapelverfahren eingesetzt. Eine primär dialogmäßige Erarbeitung der Punkt- und Elementnetze erfolgt nicht. Lediglich Korrekturen an Einzelpunkten und Einzelelementen können durch Vorgabe von neuen Datenkarten oder direkte Eingriffe am Bildschirm durchgeführt werden.

Bemerkungen zur Schreibweise

Matrizen und Vektoren werden durch fette Buchstaben hervorgehoben, für skalare Größen und Indizes werden dünne Buchstaben benutzt. Die Bedeutung der Symbole ist im Text erklärt. Weiterhin werden folgende Zeichen benutzt:

$[\quad]$ die in Klammern angegebenen Elemente
werden in einem Zeilenvektor oder einer
Zeilenmatrix zusammengefaßt

$\{ \quad \}$ die in Klammern angegebenen Elemente
werden in einem Spaltenvektor oder einer
Spaltenmatrix zusammengefaßt

$\mathbf{A}^t$ ist die Transponierte von $\mathbf{A}$

-ZZZZZ- die Zeichenkette ist ein Lichtzeichen
oder ein Befehlssymbol

Probleme bei der Datenaufbereitung bei Finite-Element-Rechnungen

2.1 Herkömmliche Datenaufbereitung

Hier wird nicht der physikalisch-mechanische bzw. mathematische Hintergrund der Verschiebungsmethode behandelt, vielmehr sollen die manuellen Arbeitsanteile in den einzelnen Bearbeitungsschritten angegeben werden.

Wie im allgemeinen Fall der Problemlösung mit dem Hilfsmittel EDV-Anlage im weitesten Sinn, können auch hier drei Bearbeitungsphasen im zeitlichen Durchlauf unterschieden werden, in denen vom Berechnungsingenieur genau definierte Teilaufgaben zu erledigen sind. Die Phasen lassen sich mit folgenden Begriffen charakterisieren:

Phase 1:

- Erkennen des Problems und Einordnen in ein Bearbeitungsschema d.h.
Klären des einzuschlagenden Lösungsweges

Phase 2:

- Erstellen der Eingabedaten
Kontrollieren und Korrigieren der Daten sowie
Rechnen auf der EDV-Anlage

Phase 3:

- Sichten und Bewerten der Ergebnisse, eventuell
Ändern von Eingabedaten und erneutes Rechnen
auf der EDV-Anlage.

Eine erste Untersuchung ist hinsichtlich der Problemstellung vorzunehmen. Zunächst müssen die konstruktiven

Gegebenheiten des zu berechnenden Bauteils erfaßt werden. Ebenfalls anhand der vorliegenden Konstruktionsunterlagen muß der Berechnungsingenieur versuchen, sich ein möglichst realistisches Bild des Spannungszustandes im Tragwerk unter den vorgegebenen Belastungen zu machen. Mit diesen Erkenntnissen muß er dann entscheiden, welche Elementtypen in bestimmten Bereichen der Struktur zur Idealisierung des Bauteils herangezogen werden sollen. Er muß also einerseits dem erwarteten Spannungszustand möglichst gut begegnen und andererseits möglichst allen konstruktiven Belangen Rechnung tragen. Dieses setzt allerdings voraus, daß er über die Leistungsfähigkeit der einzelnen Elementtypen genauestens orientiert ist.

Aus diesem ersten Arbeitsabschnitt resultieren zunächst ein grober Topologieentwurf für das Tragwerk, sowie eine qualitative Aussage über die in einzelnen Bereichen der Struktur einzusetzenden Elementtypen. Daneben werden erste Überlegungen zu der erforderlichen Lage und Anzahl der Strukturknotenpunkte in diesen Bereichen angestellt, ohne allerdings diese Punkte bereits in einem Koordinatensystem zu fixieren. Ebenfalls hier wird die Unterteilung der gesamten Struktur in Unterstrukturen vorgenommen, falls diese von der Bauteilgröße her sinnvoll ist. Dieser Arbeitsabschnitt ist somit bestimmend für den gesamten Bearbeitungsdurchlauf und enthält fast ausschließlich kreative Tätigkeiten des Berechnungsingenieurs.

An diesen kreativen Arbeitsabschnitt schließt sich nun die Phase der Datenaufbereitung an, die in den meisten Fällen noch durch viele manuelle Arbeitsanteile gekennzeichnet ist. Die Art und die Anzahl der Eingabedaten werden zum einen durch das zur Verfügung stehende FEM-Programm bestimmt und zum anderen von der Größe des zu berechnenden Bauteils festgelegt.

Hier wird nun zwischen Steuerdaten und Verarbeitungsdaten unterschieden. Erstgenannte haben Schalterfunktionen im Programmdurchlauf inne, die letzteren sind zur Ermittlung der Resultate unmittelbar erforderlich. Eine Daten-gruppe ist eine Anzahl von Daten, wobei jedes Datum demselben Begriff zugeordnet werden kann.

Zunächst werden, falls erforderlich die Datenarten definiert. Im allgemeinen werden bei FEM-Programmen die Programmbausteine noch in einer vorprogrammierten Reihenfolge durchlaufen, d.h. nur beim Abweichen von diesem Durchlauf wären Steuerdaten erforderlich. Dann setzen sie den vorprogrammierten Durchlauf außer Kraft und sorgen für die Verkettung der Modulen in der neuen vorgesehenen Reihenfolge und steuern so den Verarbeitungsprozeß und meistens auch die Art der Ergebnispräsentation.

Bei den Verarbeitungsdaten können folgende wichtige Datengruppen angegeben werden:

Strukturknotenpunkte

Freiheitsgrade der Strukturknotenpunkte

topologische Daten

elementbeschreibende Parameter

Elastizitäts-Kennwerte

Knotenpunktlasten

Lasten anderer Art

andere Daten (Zwangsbedingungen
Symmetriebedingungen)

Strukturknotenpunkte

Am weitesten fortgeschritten ist die Rechnerunterstützung bei der Ermittlung der Strukturknotenpunkte. Dennoch wird in vielen Fällen dieser Vorgang noch manuell erledigt. Dann werden alle Punkte direkt auf der Zeichnungsvorlage markiert und anschließend ausge-

messen oder mit einem Digitalisiergerät aufgenommen.

Freiheitsgrade der Strukturknotenpunkte

Hier brauchen lediglich die zugelassenen Freiheitsgrade berücksichtigt zu werden. Sie müssen dann durch ein Symbol gekennzeichnet werden.

Zusammen mit den topologischen Daten und den elementbeschreibenden Parametern können mit Hilfe der Elementprogramme Steifigkeitswerte berechnet werden. Damit ist es dann auch möglich, zu entscheiden, ob ein Freiheitsgrad zugelassen werden darf oder nicht, je nachdem ob einer Verschiebungsrichtung oder einer Verdrehung ein Steifigkeitswert zugeordnet werden kann oder nicht. Diese Analyse kann automatisch von einem Rechnungsprogramm vorgenommen werden. Damit entfällt dann die manuelle Spezifikation der Freiheitsgrade der Strukturknotenpunkte.

Topologische Daten

Die Topologie des Tragwerks wird beschrieben, indem Elementknotenpunkte definiert werden. Ihre Verknüpfung untereinander zeigt die Zugehörigkeit zu einem Element an.

Elementbeschreibende Parameter

(z.B. Flächenträgheitsmomente, Elementdicke)

Elastizitäts-Kennwerte

Diese Daten werden von den 'Elementprogrammen' im FEM-Programmsystem benötigt, um die Elementsteifigkeitsmatrizen zu berechnen.

Knotenpunktlasten

Lasten anderer Art

Erstere Lasten sind an die Knotenpunkte und die dort zugelassenen Freiheitsgrade gekoppelt und werden

durch die Angabe eines Zahlenwertes definiert.

Mögliche andere Lasten, z.B. konstante Temperaturverteilungen, können durch Angabe eines Zahlenwertes dem Strukturknotenpunkt direkt zugeordnet werden.

Andere Daten

Diese Datengruppe wird hier nicht weiter behandelt. Sie beinhaltet alle in den vorher erwähnten Datengruppen nicht enthaltenen Daten, die in ihrer Bedeutung z.T. sehr von dem zur Verfügung stehenden FEM-Programm abhängig sind.

Um nun alle Daten an das Verarbeitungsprogramm übergeben zu können, müssen sie auf einem Datenträger abgelegt werden. Dies geschieht oft noch auf Umwegen und wird auch meistens nicht unmittelbar vom Berechnungsingenieur selbst durchgeführt. Bei Aufgabenstellungen mit einer geringen Anzahl von Eingabedaten kann manchmal beobachtet werden, daß der Bearbeiter die Daten entsprechend den Anforderungen des FEM-Programms selbst ablocht und dabei die einzelnen Parameter syntaxgerecht auf der Karte anordnet. Es ist jedoch sehr schnell der Punkt erreicht, wo diese Methode wirtschaftlich nicht mehr zu vertreten ist. Insbesondere bei umfangreichen Berechnungsaufgaben wird deshalb ein anderer Weg eingeschlagen.

Sämtliche Daten werden dann vom Berechnungsingenieur in Formulare eingetragen. Diese sind den Forderungen des Problemprogramms entsprechend für die einzelnen Datengruppen unterschiedlich aufgebaut und müssen unter Einhaltung der Syntax ausgefüllt werden. Die nachstehende Tabelle zeigt die für die weiter vorne angegebenen Datengruppen erforderlichen Angaben, um die Daten innerhalb der Gruppe zu spezifizieren.

Diese Formularinhalte werden anschließend von besonderem Personal auf einen Datenträger übertragen.

Datengruppe

Notwendige Angaben
zur Spezifikation

Struktur- knotenpunkte	Punktnummer (extern) Punktindex (intern) Koordinaten
Freiheitsgrade	werden durch eine Kennung spezifiziert (meistens noch auf der Karte für die Struktur- knotenpunkte angeordnet)
topologische Daten	Elementtyp Elementknotenpunkte (= 'Elementkarte')
elementbeschreibende Parameter	Zahlenwerte (meistens noch auf der Elementkarte angeordnet)
Elastizitäts-Kennwerte	Materialnummer Zahlenwerte
Knotenpunktlasten	Punktnummer und/oder Freiheitsgradkennung Zahlenwerte
Lasten anderer Art	Punktnummer Zahlenwerte
andere Daten	---

Spezifikation der Datengruppen

Neben den auftretenden Meßfehlern beim Ausmessen der Zeichnungsvorlage können zusätzliche Schreib- und Lesefehler beim Ausfüllen der Formulare und beim Übertragen auf den Datenträger entstehen. Fehler bei der Verknüpfung von Knotenpunkten bei der Definition der Topologie können ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Das bedeutet, daß die Daten, wenn sie zum Berechnungsingenieur zurückkehren, einer Kontrolle unterzogen werden müssen. Oft geschieht dieses schon durch graphische Präsentation der Topologie und des Punktnetzes auf einem Plotter oder Bildschirm. Ist diese Art der Kontrolle nicht möglich, so ist zumindest eine Stichprobenkontrolle aller Daten erforderlich. Eine Überprüfung von numerischen Daten muß direkt durch Vergleich der Zahlenwerte erfolgen. Mit der Freigabe des eventuell korrigierten Datensatzes ist der Vorgang der Datenaufbereitung abgeschlossen.

Nun ist die überwiegende Zahl der Tätigkeiten in dieser Phase von der Problembearbeitung her als untergeordnet zu betrachten, da bei den meisten, abgesehen von Datenkorrekturen, kein echter Lösungsbeitrag mehr geleistet wird. Dennoch sind durchaus kreative Tätigkeiten vorhanden. So ist es zum Beispiel ein kreativer Vorgang, wenn die Lage eines Strukturknotenpunktes festgelegt wird, die sich anschließende Ermittlung und Fixierung seiner Koordinatenwerte ist wiederum eine Routinetätigkeit. Es liegt deshalb nahe, sämtliche Routinetätigkeiten dem Rechner zu überlassen, den Entscheidungsfreiraum des Benutzers aber dadurch zu erhalten, daß er interaktiv alle Aktionen steuern und auch kontrollieren kann.

Auf diese Arbeitsschritte der Datenaufbereitung folgt im allgemeinen ein erster Rechenlauf mit dem Verarbeitungsprogramm.

In der dritten Phase schließlich werden die Berechnungsergebnisse begutachtet und einer Wertung unterzogen. Offensichtlich unrealistische Ergebnisse können von fehler-

haften Koordinaten oder falscher Topologie verursacht werden, oder ihren Ursprung in der Anwendung von Elementtypen haben, die den Beanspruchungen im Tragwerk nicht genügen. Ist die Fehlerursache gefunden, dann kann die Rechnung mit den modifizierten Eingabedaten wiederholt werden.

2.2 Vorgeschlagene interaktive Datenaufbereitung

Die soeben beschriebene Art der Datenaufbereitung geschieht, sieht man von den z. T. erforderlichen Modifikationen einiger Eingabedaten nach der ersten Rechnung einmal ab, in dem als Phase 2 bezeichneten Arbeitsabschnitt. Das hier vorgestellte Verfahren zur interaktiven Datenaufbereitung beginnt nun schon in der Phase 1, nämlich bereits zu dem Zeitpunkt, wenn der erste Topologieentwurf durchgeführt wird und die konstruktiven Gegebenheiten des Bauteils untersucht werden.

Grundgedanken des Verfahrens

Es wird davon ausgegangen, daß dem Benutzer nach Möglichkeit nur die kreativen Tätigkeiten übertragen, und daß die Routinetätigkeiten vollständig vom Rechner übernommen werden. Einschränkend soll jedoch gleich festgestellt werden, daß eine gänzlich vollautomatisch betriebene Datenaufbereitung nicht möglich erscheint, da mit Sicherheit immer einige manuelle Tätigkeiten übrig bleiben werden, die der Rechner einfach nicht übernehmen kann, da er eben nur auf Anweisung Arbeiten ausführt und zu kreativen Entscheidungen nicht fähig ist, man denke z.B. an die Plazierung von konstruktiv nicht mehr veränderbaren Punkten der Struktur.

Die primäre Tätigkeit des Berechnungsingenieurs besteht demnach darin, laufend mit der Rechenanlage zu kommunizieren. Dieses erfolgt geräteseitig über dialogfähige Geräte und wird dabei von der bekannten Menüfeldtechnik unterstützt. Als dialogfähig im hier gebrauchten Sinn werden Digitalisiergeräte und aktive graphische Bildschirme betrachtet. Die Arbeitsweise dieser Geräte kann als bekannt vorausgesetzt werden. Sie wird aber in den Kapiteln, die sich mit der Programmentwicklung befassen, kurz angesprochen.

Das hier vorgeschlagene Verfahren basiert zunächst auf der Verknüpfung eines Digitalisiergerätes und eines aktiven graphischen Bildschirms, die zusammen mit einer Rechenanlage in einem on line Verbund betrieben werden. Den erstgenannten Geräten fallen im Verlauf der Datenaufbereitung unterschiedliche und vorerst noch genau festgelegte Aufgaben zu. In einer etwas erweiterten Konzeption, die am Ende dieses Abschnittes vorgestellt wird, kann dieses auf den ersten Blick starre Schema durchbrochen werden, insbesondere dann, wenn ein Digitalisiergerät und ein aktiver Bildschirm nicht gleichzeitig zur Verfügung stehen und nicht zur Hardwareausstattung gehören.

Eine beträchtliche Reduktion der manuellen Tätigkeiten kann dadurch erzielt werden, daß die Zahl der Vorgabedaten, hier der Strukturknotenpunkte, auf ein Minimum reduziert wird. Diese Anzahl der Strukturknotenpunkte, im folgenden als Basisgeometrie bezeichnet, ist dadurch gekennzeichnet, daß sie für eine Idealisierung und damit zur Erzeugung eines brauchbaren Elementnetzes nicht ausreicht. Die Knotenpunkte sind aber durch ihre Anzahl und Plazierung auf dem Bauteil geeignet, die konstruktiven Gegebenheiten, d.h. die Konturen des Bauteils genügend genau zu beschreiben.

Die Ermittlung der Basiskoordinaten erfolgt nun am Digitalisiergerät. Hier beginnt auch der kreative Dialog zwischen dem Benutzer und der Rechenanlage. Durch Ansprechen von symbolhaften Anweisungen auf einem Menüfeld kann der Dialog geführt werden. Neben der übergeordneten Steuerung des Prozesses der Datenaufbereitung werden aber auch auf der Ebene der Problembearbeitung Definitionen und Manipulationen an den Koordinaten vorgenommen, solange bis alle erforderlichen Strukturknotenpunkte der Basisgeometrie vorliegen. Die Definition einer Basisgeometrie ist für das hier vorgestellte Verfahren

eine wesentliche Voraussetzung. Will man also die Vorteile nutzen, so müssen die Punkte entweder wie oben angegeben ermittelt werden, oder aber durch Ausmessen der Zeichnungsvorlage beschafft werden. Der kreative Dialog beginnt dann allerdings erst nach der Festlegung der Knotenpunkte.

In dem hier vorgestellten Verfahren erfolgt nun der Übergang vom Digitalisiergerät zum aktiven Bildschirmgerät. Ausgelöst wird dieser Vorgang wiederum durch eine Anweisung des Benutzers, die Kontrolle des Prozesses in der übergeordneten Ebene zum Bildschirmgerät zu verlagern. Gleichzeitig werden die Basiskoordinaten von dem nun ebenfalls aktivierten Bildschirmprogramm übernommen und zur weiteren Verarbeitung bereit gehalten. Durch eine erneute Entscheidung auf der Ebene der Ablaufsteuerung gelangt der Benutzer auf die Ebene der Problembearbeitung. Hier erfolgt die Aufbereitung der Daten in definierten 'Unterebenen':

- Idealisierungsebene
- Unterstrukturebene
- Element- bzw. Punktebene

Diese Aufteilung entspricht im wesentlichen der üblichen Unterteilung des gesamten Tragwerkes in diverse Unterstrukturen mit einer Anzahl von Punkt- bzw. Elementgruppen.

Sowohl die Auswahl der jeweiligen Bearbeitungsebene als auch der Reihenfolge der zu bearbeitenden Datengruppen bleibt dem Benutzer überlassen. Es sind aber in jedem Fall bei der Neuerstellung von Daten die folgenden Aufgaben zu erledigen:

- Erweiterung des Basispunktnetzes zum vollständigen Punktnetz für das gesamte Tragwerk
- Spezifikation der Freiheitsgrade der Strukturknotenpunkte
- Festlegen der Topologie durch die Definition der Elementknotenpunkte

- Definition und Zuordnung der elementbeschreibenden Parameter
- Spezifikation und Zuordnung der Elastizitätskennwerte
- Steuerdaten festlegen

Die interaktive Aufbereitung der Belastungen wird in dem hier vorgestellten Verfahren noch nicht durchgeführt.

Die Systematik in der Bearbeitung der verschiedenen Datengruppen auf den angesprochenen Bearbeitungsebenen ist weitgehend identisch. Die Tätigkeit des Berechnungsingenieurs liegt darin, daß er

- steuert und kontrolliert
- erforderliche Änderungen sofort interaktiv durchführt
- die Auswahl der Generierungsprogramme vornimmt und lediglich ein Minimum an Eingabeparametern für diese Programme spezifiziert
- die Anweisungen zur Durchführung der Routine-tätigkeiten an den Rechner übermittelt

Die syntaxgerechte Fixierung der Daten auf einem Datenträger wird ihm vom Rechner abgenommen, da dort die Eingabeformulare für das FEM-Programm als Ausgabevorschrift nachgebildet sind.

Wesentlich in dem hier vorgestellten Verfahren ist auch die Ermittlung einer möglichst kleinen Bandbreite. Dies geschieht ohne Einfluß des Benutzers nach Abschluß der Generierungsphase, aber immer noch auf der Ebene der Problembearbeitung, allerdings auf der hier höchst möglichen, der Idealisierungsebene.

Nachdem dieses geschehen ist stehen alle generierten Daten dem Benutzer als Datei zur Verfügung. Dieser kann

sie nun direkt, falls im on line Betrieb realisiert, an das FEM-Programm übergeben oder als Kartenstapel, Magnetbanddatei oder auf einem anderen Datenträger archivieren.

Änderungen der Gerätekonfiguration

Das bis hierher vorgestellte Verfahren basiert auf einem on line Verbund von Digitalisiergerät, Bildschirmgerät und Rechenanlage. Es ist denkbar, daß nicht immer diese Gerätekonfiguration betrieben werden kann, da einzelne Geräte nicht verfügbar sind, oder aber, daß die Rechnerkapazität nicht ausreicht, um die z. T. doch recht umfangreichen Programmteile ständig im Rechner zu halten. Das vom Autor für die Realisierung modifizierte Verfahren geht immer noch von einer definierten Zuordnung der Aufgaben zu den einzelnen Geräten aus, die gesamte Konfiguration wird jedoch off line betrieben, dergestalt, daß lediglich noch der aktive Bildschirm direkt mit der Rechenanlage verbunden ist, und daß das Digitalisiergerät nun separat genutzt wird. Die Verknüpfung von Digitalisiergerät und Bildschirmgerät erfolgt hier dann nur noch über die Daten auf dem Datenträger. So wird am Digitalisiergerät ein Lochstreifen erstellt, welcher neben den Koordinaten der Basispunkte in Form einer Nummer alle Befehle enthält, die während der Bearbeitung am Digitalisiergerät vom Benutzer ausgingen. Dieser Lochstreifen wird **danach** in den Rechner eingelesen und von einem Interpretationsprogramm ausgewertet. Dabei werden dann alle Befehle ausgeführt und alle Manipulationen an den Basispunkten vorgenommen. Die Systematik in der Problembearbeitung bleibt durch diese ausschließlich geräteabhängige Modifikation des Verfahrens unberührt.

Der modulare Aufbau des Programmes würde es auch erlauben, das Verfahren mit einer unter der Bezeichnung IKF (13,15) bekannten Gerätekonfiguration - Digitalisier-

gerät - passiver graphischer Bildschirm - Kleinrechner - zu betreiben. Hier ist dann allerdings eine Neuordnung der Aufgaben zu den einzelnen Geräten erforderlich. Neben der Ermittlung der Basisgeometrie sollten alle anderen Arbeiten ebenfalls am Digitalisiergerät durchgeführt werden.

Vorbemerkungen zur Programmentwicklung

Obwohl eine definierte Gerätekonfiguration als Basis für die Konzeption des interaktiven Programmsystems vorgegeben war, wurde doch bei der Entwicklung des Systems großer Wert auf eine möglichst allgemeine und übertragbare Form der Programmgestaltung gelegt. Insbesondere wurden folgende Aspekte beachtet:

- modularer Aufbau des gesamten Systems
- Einhaltung des 'Ebenenprinzips'
- Trennung von Dialog- und Berechnungsprogrammteilen
- weitgehende Standardisierung bei den Variablen sowie im strukturellen Aufbau der Programmteile und der Menüfelder auf dem Bildschirm
- Verwendung einer höheren Programmiersprache (FORTRAN IV)
- genaue Definition der Softwareschnittstellen

Die für das Bildschirmgerät CDC 250 vorhandene graphische Grundsoftware wurde soweit wie möglich genutzt. Ihre Funktion beschränkt sich jedoch auf die Darstellung von Bildelementen auf dem Schirm und die Erzeugung der sog. 'Interrupts', die Eingriffe in den Kernspeicher des Bildschirmgerätes erlauben.

Um dem Benutzer des Systems in der Bearbeitungsreihen-

folge möglichst freie Hand zu lassen, wurden für alle wichtigen Datengruppen separate Module entwickelt, insbesondere für

- die Strukturknotenpunkte
- die topologischen Daten
(Elementknotenpunkte)
- elementbeschreibende Parameter
Elastizitäts-Kennwerte

Bedingt durch die Gerätekonfiguration wurde ein zusätzlicher Modul für die Ermittlung der Basisgeometrie entwickelt

- das Interpretationsprogramm.

Im realisierten off line Verfahren kann dieser Baustein deshalb auch nicht im Dialog auf der Ebene der Prozeßsteuerung angesprochen werden. Die Integration dieses Bausteins in das gesamte System ist aber durch die Definition der Schnittstellen gewährleistet, wenn die Voraussetzungen von der Geräteseite erfüllt werden.

Ein übergeordneter Programmbaustein ermöglicht dem Benutzer die Durchführung des äußeren Dialogs zur Auswahl eines Programmteiles für die Bearbeitung der gewünschten Datengruppe.

Diese Programmteile sind nach folgendem Schema strukturiert. Sie enthalten Abschnitte für

- die Durchführung des Dialogs auf der Ebene der Problembearbeitung
(Auswahl der Unterebenen)
- die Generierung der Daten
- die Manipulation der Daten
- die Rückkehr auf die Ebene der Steuerung des Arbeitsablaufes

Die Menüfeldsymbole sind entsprechend dieser Einteilung zu Symbolgruppen zusammengefaßt und in immer der gleichen Weise auf dem Bildschirm plaziert.

Ein für die Datenaufbereitung wichtiger Modul ist das Ausgabeprogramm. Dort werden nämlich für alle Daten-gruppen die Eingabeschemata für das FEM-Programm nachgebildet. Dieses ist dann auch der einzige Programmteil, der beim Übergang auf ein anderes FEM-Programm geändert werden muß.

3. Aufbau eines dialogfähigen Gesamtsystems

3.1 Gerätekonfiguration

3.1.1 Rechenanlage

Im Rechenzentrum von VFW-Fokker in Bremen ist eine CDC 6500 Großrechenanlage mit 64K adressierbaren Kernspeicherplätzen installiert. Als Massenspeicher dienen Magnetplatten mit insgesamt ca. 3 Mio. Worten Speicherkapazität. Direkt angeschlossen sind 6 Magnetbandeinheiten, ein Kartenleser, zwei Schnelldrucker, sowie ein Lochkartenstanzer. Ein Lochstreifenleser steht nicht zur Verfügung.

3.1.2 Digitalisiergerät

Zur Koordinatenerfassung dient ein Digitalisiergerät vom Typ HAROMAT mit on line angeschlossenem Lochstreifenstanzer. Es ist mit einer Meßlupe auf fahrbarem Schlitten, sowie einer Tastatur zur Eingabe von Ziffern, Buchstaben und Sonderzeichen ausgerüstet. Der Koordinatenursprung kann manuell eingestellt werden. Für den Dialogbetrieb ist dieses Gerät aber nicht direkt nutzbar, da es nicht mit einer Rechenanlage verbunden ist. Auch eignen sich Meßlupe und Schlitten nicht besonders gut für das ständige Pendeln zwischen einem Befehlsfeld und der Analogvorlage. Es wurde deshalb für alle Arbeiten mit Digitalisiergeräten, die an der Ruhr-Universität Bochum im Institut für Angewandte Informatik installierte Konfiguration des Interaktiven Konstruktionsplatzes (IKP) ⁽¹³⁾ benutzt. Dort werden ein Koordinatenerfassungsgerät HAROPEN, ein Kleinrechner sowie ein Plotter und passiver Bildschirm im Verbund betrieben. Der HAROPEN ist mit einem Abtaststift zum Digitalisieren und zur Übergabe von Befehlen aus einem Menüfeld ausgerüstet. Der Kleinrechner mit FORTRAN-Compiler und Plattenspeicher verarbeitet die ankommenden Signale. Die Ergebnisse werden auf einem Bedienungsblattschreiber protokolliert und zum Teil über einen Lochstreifenstanzer ausgegeben. Die graphische Informationsausgabe erfolgt über den Plotter.

3.1.3 Bildschirmgerät

Das Bildschirmgerät CDC 250 ist on line mit der Rechen-

anlage CDC 6500 verbunden. Der Schirm hat Rechteckform und eine Arbeitsfläche mit 1024 X 1024 adressierbaren Rasterpunkten. Mit einer Funktionstastatur werden die Betriebszustände des Gerätes gesetzt. Die alpha-numerische Tastatur dient zur Eingabe von Ziffern oder Zeichenketten und mit dem Lichtstift schließlich können beleuchtete Stellen auf dem Schirm identifiziert werden. Weiter besteht die Möglichkeit, das dargestellte Bild durch Tastendruck auf Mikrofilm zu nehmen.

3.2 Programmentwurf

Kernstück eines derartigen interaktiven Gesamtsystems ist eine leistungsfähige Rechenanlage mit genügend Speicherkapazität, um auch umfangreichere Teilprogramme ständig im Kern zu erhalten. Hintergrundspeicher, wie Magnetplatte oder -trommel dienen zum Abspeichern von Dateien, die entweder während eines Arbeitsprozesses aufgebaut oder aber bei bestimmten Problemen von Magnetbändern aus zur Verfügung gestellt werden. Ein Datentransportpaket wahrt den ständigen Zugriff vom Kernspeicher in jeder Phase des Arbeitsablaufes. Periphere Geräte wie Kartenleser, Schnelldrucker übernehmen die Ein- bzw. Ausgabe des Programmes selbst oder des zur Verarbeitung anstehenden Datensatzes und der Ergebnislisten. Weitaus wichtiger aber sind die Zusatzgeräte mit denen der Benutzer in den Dialog mit der Rechenanlage eintreten kann: Digitalisiergerät und Bildschirmgerät. Zu einem Dialog in bescheidenen Ausmaßen wäre auch ein Plotter geeignet, darauf soll aber hier nicht eingegangen werden. Das Digitalisiergerät und der Bildschirm sind nun sowohl direkt mit der Rechenanlage, als auch untereinander verbunden, d.h. die Ablaufkontrolle kann einerseits jederzeit von einem Gerät zum anderen übergeben werden, andererseits ist auch die Rückgabe der Kontrolle an das Hauptrechnersystem immer möglich. Diese Verlagerung der Kontrolle hängt vom definierten Ziel eines speziellen Arbeitsganges ab. So ist es z.B. möglich, daß eines der Geräte ganz vom Dialog ausgeschlossen bleibt, weil es sich nicht für eine spezielle Aufgabe eignet oder aus bestimmten Gründen nicht benutzt werden kann.

3.2.1 On line Betrieb

Hier soll nun allerdings vorausgesetzt werden, daß sowohl das Digitalisiergerät, als auch das Bildschirmgerät direkt an den Großrechner angeschlossen und ständig betriebsbereit sind, d.h. die in der Abb. 1 dargestellte Konfiguration vorliegt. Für die graphische Informationsausgabe sind zwei Plotter vorgesehen. Von einem übergeordneten Programmsteuersystem gelangt die Ablaufkontrolle an eines der dialogbereiten Geräte. Welches gewählt wird, hängt von der aktuellen Problemstellung ab, sollte aber programmtechnisch weitgehend problemunabhängig realisiert werden. Da in dieser Phase zumindest eine grobe Lösungsstrategie feststeht, sind auch die evtl. notwendigen Dateien im Hintergrund aufgebaut bzw. als Leerdateien vorbereitet worden. Alle problemabhängigen, gerätespezifischen Unterprogramme sind entsprechend der Kontrollverlagerung ebenfalls aktiviert und stehen dem Benutzer zur Verfügung. Zweckmäßigerweise werden die den dialogfähigen Geräten zugeordneten Softwarepakete in Overlay-Struktur aufgebaut. Dadurch können bei Änderungen der Programmphilosophie leicht bestimmte Bausteine ausgetauscht oder modifiziert werden, ohne daß in das gesamte Programm empfindliche Eingriffe gemacht werden müssen. Die Abb. 1 zeigt drei verschiedene Softwarepakete in der Rechenanlage:

- Interpretationsprogramm -
- Bildschirmprogramm -
- Finite-Element-Programm -

In der vorliegenden Arbeit sind die beiden ersten Teilprogramme für die interaktive Datenaufbereitung konzipiert, insbesondere werden die Knotenpunkte am Digitalisiergerät bzw. am Bildschirmgerät ermittelt, die finiten Elemente aber ausschließlich am Bildschirm generiert. Diese Programme für die Datengenerierung werden in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich behandelt. Deshalb sollen hier noch einige andere Anwendungsmöglichkeiten eines derartigen, dialogfähigen Gesamtsystems aufgezeigt werden.

Bleibt man zunächst noch bei der Tragwerksberechnung mit finiten Elementen, dann kann das FEM-Programm selbst auch in den interaktiven Prozeß mit einbezogen werden. Der Informationsaustausch zwischen dem Benutzer und dem FEM-Programm erfolgt dann primär über den Bildschirm. Ein solches interaktives System ist von Grieger ⁽¹⁰⁾ für das Programmsystem ASKA entworfen worden. In geradezu idealer Weise lassen sich damit insbesondere iterative Prozesse, die nach definierten Rechenschritten Benutzerentscheidungen erfordern, abwickeln.

Auch Konstruktionszeichnungen können auf dem interaktiven Weg sehr rationell erstellt werden. Dabei sind zwei wichtige Phasen des Konstruktionsprozesses zu unterscheiden. In der Entwurfs- oder Konzeptphase, wo ausgehend von einer Handskizze meistens nur die Hauptabmessungen des Bauteils festgelegt werden, sollte man dem Digitalisiergerät den Vorzug geben, da es bestimmte Vorteile gegenüber einem Bildschirmgerät aufweist; zum einen ist die Arbeitsfläche wesentlich größer als die aktivierbare Fläche bei den bis jetzt zur Verfügung stehenden Bildschirmgeräten, zum anderen, und das ist ein psychologischer Gesichtspunkt, wird sich der Konstrukteur an die einem Zeichenbrett ähnliche Abtastfläche leichter gewöhnen. Die am Digitalisiergerät durchgeführten Arbeiten lassen sich leicht über den ebenfalls zur Verfügung stehenden Bildschirm kontrollieren. Der Schirm wird in dieser Phase in erster Linie dazu benutzt, sowohl die Kontur der interaktiv gefertigten Entwurfszeichnung, als auch Kontrollinformationen auszugeben. Auch können Fehlermeldungen des Systems bequem und übersichtlich dargestellt werden. Im Hauptspeicher der Rechanlage befinden sich dann die zur Interpretation der vom Digitalisiergerät kommenden Befehle erforderlichen Teilprogramme, die notwendige 'Konstruktionssoftware' und einige Routinen zur Darstellung der Informationen auf dem Schirm. Hier können Interpretationsprogramm und Bildschirmprogramm nicht mehr genau gegeneinander abgegrenzt werden, vielmehr werden die Unterprogramme gleichwertig nebeneinander benutzt. Genauso greifen Interpretationsprogramm und 'Kon-

struktionssoftware' ineinander über, da nach Erkennen der Befehle ihre Ausführung durch das 'Konstruktionsprogramm' erfolgt. Da in der Entwurfsphase lediglich die Kontur des Bauteils und keine Details festgelegt werden, genügt hierfür ein relativ einfaches Softwarepaket, das z.B. gerade Verbindungslinien erzeugt, Parallelen zieht usw.. Die Bereiche, die später detailliert werden sollen, brauchen vorerst nur durch ein Symbol gekennzeichnet werden. Für Dokumentationszwecke wird die Entwurfszeichnung automatisch mit einem Plotter erstellt. Diese Art des interaktiven Konstruierens mit einem Digitalisiergerät, in der Problemstellung allerdings zunächst noch auf das Aufgabengebiet des Bauingenieurs bezogen, hat sich bereits bewährt, wie erfolgreiche Arbeiten von Fleßner ⁽¹³⁾ zeigen. Bei der Philosophie des Interaktiven Konstruktionsplatzes (IKP) steht deshalb auch nicht mehr die bloße Übernahme der Punktkoordinaten im Vordergrund, sondern der Konstrukteur oder Berechnungsingenieur benutzt das Gerät, um im Dialog vor allen Dingen seine schöpferischen Fähigkeiten in jeden Arbeitsgang mit einfließen zu lassen und überläßt es dem Rechner, die Routinearbeiten durchzuführen. Durch die ständige optische Kontrolle aller vom Rechner ausgeführten Arbeiten über den Bildschirm können Fehler sofort erkannt und behoben werden.

Für die Detaillierungs- oder Ausarbeitungsphase ist das aktive Bildschirmgerät besonders gut geeignet. Hat der Benutzer die Kontrolle an dieses Gerät abgegeben, werden auch die entsprechenden Teilprogramme im Rechner ausgetauscht. Die Übergabedateien mit dem mathematischem Modell der angefertigten Zeichnungsvorlage stehen nun ebenfalls dem Bildschirmgerät zur Verfügung. Das Interpretationsprogramm wird vorerst nicht mehr benötigt. An seine Stelle tritt eine bildschirmorientierte, höher entwickelte 'Konstruktionsprache', wie sie von Gorny ⁽¹⁴⁾ beschrieben wird. Nachdem die Entwurfszeichnung auf dem Schirm dargestellt ist, liegt es am Konstrukteur, diese Arbeitsvorlage interaktiv so abzuändern bzw. zu erweitern, daß alle notwendigen Angaben daraus ersichtlich sind. Nachteilig wirkt

- 22 -

sich manchmal die begrenzte Fläche des Bildschirms aus. Deshalb ist es auch vorteilhaft, nur ausgesuchte Bereiche vergrößert auf dem Schirm darzustellen. Die in der Detaillierungsphase benötigten Normteile und Werkstoffkennwerte, die auf Dateien im Hintergrund abgelegt sind, können bei Bedarf bequem durch Aktionen am Bildschirm abgerufen werden. Auch die notwendigen Schnittzeichnungen lassen sich interaktiv sehr gut erstellen.

Natürlich müssen auch Arbeitspausen mit eingeplant werden. Dazu wird der gesamte Bildschirminhalt auf einen externen Speicher transferiert und bei Bedarf wieder abgerufen. Wird die Arbeit lediglich für kurze Denkpausen unterbrochen, dann brauchen nur die Programme aus dem Kernspeicher genommen zu werden. Sind die weiteren Schritte überlegt, wird das Programm wieder in den Kern zurück geholt und die Arbeit kann fortgesetzt werden. Wenn alle Arbeitsgänge am Bildschirmgerät erledigt sind, wird die Kontrolle an das Hauptsteuersystem zurückgegeben. Die Stücklisten und die fertigen Zeichnungen werden über den Schnelldrucker bzw. den Plotter ausgegeben.

3.2.2 Off line Betrieb

Oft steht eine on line geschaltete Gerätekonfiguration nicht zur Verfügung. Sei es, daß entweder eines der Zusatzgeräte nicht vorhanden ist, oder daß sie aus bestimmten Gründen räumlich getrennt aufgestellt sind. Im Prinzip braucht aber im letzten Fall auf ein interaktives Gesamtsystem nicht verzichtet zu werden. Vielmehr müssen dann die Schnittstellen zwischen den einzelnen Geräten genau definiert werden. Die Abb. 2 zeigt ein solches off line betriebenes System. Dort ist das Symbol eines Magnetbandes als Aus- bzw. Eingabemedium eingetragen. Natürlich kann jeder andere Datenträger benutzt werden, wenn er nur für den Datentransport zwischen räumlich getrennten Geräten geeignet ist.

In der vorliegenden Arbeit ist dieser off line Betrieb für die interaktive Datenaufbereitung weitgehend realisiert worden. Dabei wird die Konfiguration des Inter-

aktiven Konstruktionsplatzes (Digitalisiergerät, Kleinrechner, Plotter, passiver Bildschirm (dieser ist in Abb. 2 weggelassen)) zur Erstellung eines Lochstreifens mit den Koordinatenwerten und Befehlsnummern benutzt. Diese Informationen werden mittels eines separaten Teilprogrammes über ein Magnetband auf Lochkarten umgesetzt und dem Interpretationsprogramm zugeführt. Dieses übergibt dann die manipulierten Daten über eine definierte Schnittstelle an das Displayprogramm. Dort werden ebenfalls interaktiv die Eingabedaten für die FEM-Rechnung aufbereitet und zusammen mit den hier noch manuell aufbereiteten Lasten an das FEM-Programm übergeben.

4. Die Menüfeldtechnik

Will der Benutzer den Dialog aufnehmen, muß er einerseits dem System bestimmte Informationen übermitteln, andererseits dessen Reaktionen erkennen und dann wiederum durch erneute Steuerungsvorgabe den Lösungsprozess in seinem Sinn beeinflussen. Dieser Datentransfer kann sehr bequem über ein sog. 'Menüfeld' erfolgen. Dort sind in Tabellenform alle für eine bestimmte Lösungsstrategie notwendigen Befehle eingetragen. Durch bloßes Anfahen mit dem Digitalisierstift oder Lichtgriffel wird der Inhalt der betreffenden Menüfeldposition an das System übergeben. Die Größe des Menüfeldes, und damit die Anzahl der Befehle, ist nur durch die Abmessungen der signalempfindlichen Fläche begrenzt; z.B. wäre ein Menüfeld von der Größe der Abtastfläche eines Digitalisiergerätes oder der Gesamtfläche eines aktiven Bildschirmes durchaus denkbar; da aber im Normalfall noch eine Zeichnung mit Analogwerten auf der Arbeitsfläche liegt, bzw. auf dem Bildschirm noch andere Daten dargestellt sind, beschränkt man sich meistens auf einen Teil der Gesamtfläche. Reicht ein einziges Menüfeld für den gesamten Befehlskatalog nicht mehr aus, so müssen sämtliche Befehle für die betreffenden Arbeitsgänge auf separaten Menüfeldern zusammengefaßt und nach Durchlaufen dieser Abschnitte ausgetauscht werden.

4.1 Menüfelder für Digitalisiergeräte

Diese Menüfelder werden meist in Rechteckform gestaltet. Der eigentliche Befehls- und Datenbereich in Abb. 3 kann von einem Informationsbereich umrandet sein, wo nähere Angaben über die Aufgabe des Menüfeldes gemacht oder Erläuterungen zu den einzelnen Befehlen gegeben werden. Diese Informationsstreifen sind von der Befehlsübergabe allerdings ausgeschlossen, da sie außerhalb des durch die Referenzpunkte P_1 und P_2 definierten Befehlsbereiches liegen. Für Digitalisiergeräte ist das allg. Unterprogrammsystem MENUE⁽¹⁵⁾ entwickelt worden, mit dem Menüfelder variabler Größe und mit beliebig vielen Befehlspositionen (im sinnvollen Rahmen natürlich) aufgebaut werden können. Dabei

wird der Befehlsbereich in einzelne Unterfelder definierter Größe aufgeteilt. Diese Felder erhalten eine Identifikationsnummer und zwar vom Punkt P_1 ausgehend, zeilenförmig von links unten nach rechts oben. Ein spezieller Bereich für die Eingabe von Gleitkommazahlen kann zusätzlich in das Menüfeld mit eingeordnet werden. Wird nun eine Befehlsposition angewählt, identifiziert das Unterprogramm MENUE lediglich die Rasternummer und übergibt sie stellvertretend für den Befehl an ein Interpretationsprogramm. Dieses verzweigt dann zu einer bestimmten Auflaufadresse, führt eine Befehlsfolge aus und kehrt dann in das Unterprogramm MENUE zurück. Wird im Zahlbereich digitalisiert, übergibt MENUE nach beendeter Eingabe die fertige Zahl an das Problemprogramm. Werden andere Positionen außerhalb des Menüfeldes auf der Abtastfläche angefahren, erkennt MENUE diese nicht als Befehl an, sondern übergibt lediglich die Koordinaten des Punktes an das Problemprogramm.

Allerdings sind Rückmeldungen des Systems an den Benutzer speziell bei Digitalisiergeräten nicht über das Menüfeld möglich. Im Normalfall wird mit dem Digitalisiergerät ein Drucker on line betrieben, um zumindest die digitalisierten Koordinaten zu protokollieren. Damit können dann auch informative Nachrichten oder Fehlermeldungen über dieses Medium dem Benutzer übermittelt werden. Vorteilhafter ist es allerdings, diese Mitteilungen über einen passiven oder aktiven Bildschirm auszugeben. Dort können die Nachrichten je nach ihrem Gewicht auch blinkend dargestellt werden. Außerdem kann das Bildschirmgerät so aufgestellt werden, daß es vom Benutzer bequem zu beobachten ist, ohne daß er seinen Arbeitsplatz verlassen muß.

4.2 Menüfelder für Bildschirmgeräte

Bedingt durch die relativ kleine aktivierbare Fläche des zur Verfügung stehenden Bildschirmgerätes werden hier die Menüfeldsymbole am rechten Bildschirmrand plazierte. Die Befehle selbst sind durch Lichtzeichen repräsentiert, die beim Aufbau des Menüfeldes mit einer Befehlsnummer versehen werden. Für die Rückmeldungen des Systems sind

schmale Streifen am oberen und unteren Rand des Bildschirmes reserviert (Abb. 4). Hier wurde die von Grieger⁽¹⁰⁾ vorgeschlagene Gestaltung des Menüfeldes aufgegriffen. Sie ist insbesondere dann von großem Vorteil, wenn beim Übergang von einem Programmteil zum anderen nur einige Menüfeldsymbole ausgetauscht werden, die für die Problemlösung charakteristischen Befehle aber erhalten bleiben. Die Interpretation der Menüfeldsymbole erfolgt ähnlich wie beim Digitalisiergerät, allerdings sind die Befehlsinhalte anders. Die Befehlsnummer wird vom Programm aufgegriffen und als Sprungparameter ausgewertet. Nachdem der Befehl ausgeführt ist, kehrt das System wieder in die Warteposition zurück.

5. Interpretationsprogramm im off line Betrieb

Ist das Digitalisiergerät nicht mit einer Rechenanlage verbunden, und ist es zusätzlich hardwaremäßig nicht mit einem Menüfeld ausgestattet, dann können lediglich die Koordinatenwerte der angefahrenen Punkte und evtl. ein laufender Zähler direkt übernommen werden. Eine Manipulation dieser Daten durch Befehlssymbole im Menüfeld ist nicht möglich, da die Befehle nicht erkannt und verarbeitet werden können. Die Koordinatenerfassung wird aber gerade dann besonders effektiv, wenn bereits in einem sehr frühen Stadium Manipulationen an den Daten vorgenommen werden können. Dazu ist es notwendig, zumindest einen Kleinrechner mit dem Digitalisiergerät zu koppeln, um softwaremäßig Koordinatenwerte von Befehlssymbolen zu unterscheiden und auf einem Datenträger abzulegen. Die Befehlsnummern und die Koordinatenwerte werden anschließend von einem Interpretationsprogramm, das auf einem Großrechner implementiert ist, abgerufen und die Manipulationen werden an aktueller Stelle vorgenommen.

Das vorliegende Interpretationsprogramm wertet einen am IKP erstellten Lochstreifen bezüglich der oben definierten Daten aus. Dort wäre allerdings auch eine direkte Interpretation der Befehle möglich, da die Kapazität des Kleinrechners ausreichend ist.

Das Programm basiert auf den vom Unterprogramm MENUE lokalisierten Befehlsnummern. Diese werden hier als Sprungparameter ausgewertet, d.h. das Programm verzweigt daraufhin in ein bestimmtes Segment, führt dort eine Befehlsfolge aus und liest anschließend den nächsten Befehl vom Lochstreifen. Die Interpretation der Befehle ist gegenüber dem on line Betrieb, bedingt durch die räumliche Trennung der Geräte, also lediglich zeitlich verschoben. Deshalb ist in den Abb. 1 und 2 auch jeweils dieselbe Bezeichnung für dieses Programm benutzt worden.

6. Das interaktive Bildschirmprogramm

6.1 Programmstruktur

Die Abb. 5 zeigt ein vereinfachtes Blockdiagramm des Programmsystems -DOSTRAN-. Entsprechend der Overlaytechnik ist das MAIN-Overlay die zentrale Komponente, hier als Hauptsystem bezeichnet. Dieses ist auch das eigentliche Steuerprogramm und wird ständig im Kernspeicher der Hauptrechenanlage gehalten. Hier werden notwendige Anfangsparameter gesetzt, der Bildschirmkernspeicher vorbereitet, sowie die Dateien auf dem Hintergrundspeicher eröffnet. Außerdem werden logische Gerätenummern für die Ein- bzw. Ausgabereinheiten definiert. Dem programmierten Ablauf folgend wird nun zusätzlich ein primäres Overlay aus dem Untersystem 'A' oder 'B' geladen und die Kontrolle geht an dieses über. Sind dort alle Aktionen beendet, erfolgt der Rücksprung in das Hauptsystem.

Innerhalb dieses Systems erfolgt die Problembearbeitung in verschiedenen 'Ebenen'. Ihre Definition lehnt sich an die bei Rechnungen mit finiten Elementen üblichen Unterteilungen an. An erster Stelle steht die 'Idealisierungsebene'. Sie schließt eine Anzahl von Unterstrukturen mit den entsprechenden Gruppen ein. An letzter Stelle schließlich steht der Punkt mit den Koordinatenwerten. Diesem Schema angepaßt ist dann auch die Hierarchie bei den Ein- bzw. Ausgabedaten (Abb. 6). Die Abarbeitung der 'Ebenen' ist im Hauptsystem durch Programmschleifen realisiert; die Durchläufe pro Schleife sind durch die Anzahl der Unterstrukturen bzw. Punktgruppen festgelegt. Der Benutzer bewegt sich nun während des gesamten Arbeitsvorganges immer entweder auf (Untersystem 'A') oder zwischen (Untersystem 'B') einer dieser 'Ebenen'. (Es ist ihm jedoch freigestellt, den Standort nach Belieben zu wechseln)

6.2 Generierungsprogramme

Hier sind alle Programme für die bildschirm-orientierte Datengenerierung zusammengefaßt (Untersystem 'A'), insbesondere Routinen zur Punkt- und Elementgenerierung.

Ein Programm zur interaktiven Auswahl einer günstigen Arbeitsperspektive kann ebenfalls aufgerufen werden. Alle diese Teilprogramme können sowohl untereinander, als auch mit dem Hauptsystem in Verbindung treten. Ebenfalls ständig gewahrt ist der direkte Zugriff zu den Dateien auf dem Hintergrundspeicher. Diese können so bei Bedarf abgerufen und modifiziert, oder im Fall von Leerdateien aufgebaut werden. In Abb. 5 sind die Programmsegmente des Untersystems 'A' entsprechend dem 'natürlichen' Arbeitsablauf beim Idealisierungsvorgang eingetragen. Durch Benutzeraktionen kann jedoch die Reihenfolge im Programmdurchlauf beliebig gesteuert werden. Gelegentlich kann es vorkommen, daß der Punktgenerator nicht benutzt wird, weil alle notwendigen Knotenpunkte bereits vorliegen; dann wird einfach durch Lichtstiftaktion dieser Programnteil übersprungen.

6.3 Programme für die Arbeitsvorgabe

Diese Programme werden vom Hauptsystem immer automatisch nach Abarbeiten einer Punktgruppe oder Unterstruktur aufgerufen (Untersystem 'B', Abb. 5). Der Benutzer muß dann entscheiden, ob und wie weitergearbeitet werden soll. Er kann z.B. eine eben durchgeführte Diskretisierung überprüfen oder aber diese durch Generieren von neuen Elementen ersetzen. Im Prinzip dienen alle diese Programme zur Arbeitsvorgabe, d.h. hier kann der Benutzer schon die Reihenfolge der Arbeitsdurchführung im Untersystem 'A' bestimmen. Eine Änderung dieser Vorgabe ist allerdings jederzeit möglich. Alle angebotenen Arbeitsschritte, die gewählt werden können, sind in Textform auf dem Schirm dargestellt und vorabbeantwortet. Durch Antippen des passenden Antwortsymbols teilt der Benutzer dem System seine Entscheidungen mit. Bevor er aber das Programm wieder verlassen kann, muß er noch die Frage beantworten, ob alle hier gemachten Angaben richtig sind. Dies ist eine Sicherheitsmaßnahme, die insbesondere dann wichtig ist, wenn der Benutzer noch keine Erfahrung mit der interaktiven Technik hat. Wird diese Frage dennoch einmal falsch beantwortet, ist eine Korrektur in jedem der Teilprogramme des Untersystems 'A' möglich.

Neben diesen 'Entscheidungsprogrammen' ist hier auch noch der Ein-/Ausgabeprozessor eingefügt worden.

7. Generieren von Knotenpunktkoordinaten

7.1 Einsatz des Digitalisiergerätes

7.1.1 Gestaltung eines Menüfeldes für die Koordinatenerfassung

Hier werden nur einige grundsätzliche Erläuterungen zum äußeren Aufbau des Menüfeldes gegeben. Eine genaue Funktionsbeschreibung der verschiedenen Befehlsgruppen erfolgt in den dafür vorgesehenen Abschnitten. Die Abb. 7 zeigt das benutzte Menüfeld mit dem Befehls/Datenübergabebereich und den seitlichen Informationsstreifen. Der Befehlsteil wird durch eine Korrekturzeile in zwei Teilbereiche getrennt. Über der Korrekturzeile sind alle Befehle eingetragen, die dazu notwendig sind, die Abtastebene mit der aufliegenden Analogvorlage in ein bestimmtes Problemkoordinatensystem einzufügen. Der Unterbereich für die Zahleingabe (15 Teilfelder am rechten Rand) ist aus arbeitstechnischen Gründen ebenfalls in nächster Nähe dieser Befehle platziert. Unterhalb der Trennungslinie befinden sich die Befehle für die eigentliche Koordinatenmanipulation. Will der Benutzer nur die Koordinaten erfassen, aber keine weiteren Veränderungen vornehmen, so kann er sich in der Befehlseingabe ausschließlich auf den oberen Bereich beschränken. Lediglich bei Arbeitsende am Digitalisiergerät muß einer der Befehle in der untersten Zeile des Menüfeldes angefahren werden, um die Kontrolle an ein anderes Gerät abzugeben.

7.1.2 Koordinatensysteme und Zuordnungsmatrizen

Mit einem Digitalisiergerät können zunächst nur die Abstände bezüglich zweier orthogonaler Koordinatenachsen erfaßt werden. Der Ursprung dieses Digitalisier-Koordinatensystems (D.K.S., $O''(X_1, X_2)$) liegt meistens in der linken unteren Ecke der Abtastfläche. Die beiden Koordinatenachsen sind dann identisch mit der unteren bzw. linken Berandungslinie des Abtastrechtecks (Abb. 8). Einige Digitalisiergeräte sind mit einem manuell einstellbaren Ursprung versehen, d.h. die Bezugsachsen können dann beliebig parallel auf der Abtastfläche und auch nach außerhalb verschoben werden. Da dies aber nicht immer möglich ist, wird ein ein-

faches und übersichtliches Verfahren entworfen, mit welchem das D.K.S. rechnerintern in ein vorgegebenes, kartesisches Problemkoordinatensystem (P.K.S., O (x,y,z)) eingepaßt werden kann. Dabei sei nun vorausgesetzt, daß der Ursprung des D.K.S. in der linken unteren Ecke liegt und die zugehörigen Achsen entsprechend den obigen Angaben definiert sind. Da es einerseits kaum möglich ist, die Zeichnungsvorlage so exakt auf die Arbeitsfläche aufzulegen, daß der Ursprung O" des D.K.S. und der Ursprung O' eines Benutzerkoordinatensystems (B.K.S., O' (x',y')) genau zur Deckung kommen, oder aber andererseits dieser Ursprung gerade so ungünstig liegt, daß nicht mehr die gesamte Zeichnung auf die Arbeitsplatte paßt, wird durch Anfahren des Ursprungs mit dem Digitalisierstift ein Radiusvektor

$$\underline{e}_{aG_0} = \{X1_0, X2_0, 0\} \quad (7.1)$$

definiert und so die Lage des B.K.S. auf der Arbeitsfläche festgelegt. Die Achsen werden dadurch parallel um die Beträge $X1_0$ nach rechts bzw. $X2_0$ nach oben verschoben. Werden nun Punkte auf der Zeichnungsvorlage digitalisiert, erfolgt automatisch durch die einfache Beziehung

$$\underline{e}'_P = \underline{e}_{P_{DG}} - \underline{e}_{DG_0} \quad , \quad \underline{e}_{P_{DG}} = \{X1_P, X2_P, 0\} \quad (7.2)$$

eine Transformation in das Benutzerkoordinatensystem. Der Vektor

$$\underline{e}_0 = \{x_0, y_0, z_0\} \quad (7.3)$$

legt die Position des Ursprungs O' in einem übergeordneten Problemkoordinatensystem (P.K.S., O (x,y,z)) fest. Aus Gl.(7.2) wird dann

$$\underline{e}_P = \underline{e}'_P + \underline{e}_0 \quad (7.4)$$

Nun kann allerdings nicht vorausgesetzt werden, daß die Abtastebene gerade immer parallel zur x-y-Ebene liegt, wie

es hier der Fall war. Das bedeutet, daß vorab die Achsenrichtungen des D.G.-Koordinatensystems dem übergeordneten Problemkoordinatensystem zugeordnet werden müssen. Dies kann sehr bequem über eine Boole'sche Zuordnungsmatrix **Z** geschehen. Die Matrix **Z** wird dann entsprechend der Zuordnung mit Nullen oder Einheitswerten belegt. Durch die Multiplikation

$$(\mathbf{e}_{P_H}) = \mathbf{Z} \mathbf{e}_P' \quad (7.5)$$

entstehen dann automatisch die richtig orientierten Koordinatenrichtungen im System O (x,y,z) und durch die Vektoraddition

$$\mathbf{e}_P = \mathbf{Z} \mathbf{e}_P' + \mathbf{e}_0 \quad (7.6)$$

werden schließlich die Koordinatenwerte selbst gewonnen. Bei der Ermittlung der Matrixelemente $z_{i,j}$ kann ein evtl. definiertes Benutzerkoordinatensystem unberücksichtigt bleiben, da dessen Achsen parallel zum System O''(X1,X2) verlaufen. Der Aufbau der Zuordnungsmatrix **Z** soll zum besseren Verständnis an Hand eines einfachen Beispiels erläutert werden.

Auf den in Abb. 9a dargestellten Teilflächen einer Quaderoberfläche sollen durch Digitalisieren zusätzliche Koordinatenwerte ermittelt werden. Für eine spätere Weiterverarbeitung werden aber alle diese Koordinaten in Referenz zu dem Problemkoordinatensystem O (x,y,z) benötigt. Die drei Teilflächen müssen nun nacheinander zum Digitalisieren in die Ebene der Abtastfläche hineingeklappt werden.

a) Teilfläche 1 (Abb. 9b)

Ursprünglich liegt diese Fläche in der x-z-Ebene, d.h. die digitalisierten Werte müssen als x- bzw. z-Koordinaten übergeben werden. Da sowohl X1- und x-Achse, als auch X2- und z-Achse gleichsinnig verlaufen, werden in die Matrix **Z** nur positive Einheitswerte eingetragen, nämlich $z_{1,1} = 1$ und $z_{3,2} = 1$.

Alle übrigen Elemente sind Null. Der erste Index bezieht sich dabei jeweils auf das Problemkoordinatensystem, der zweite auf das Digitalisierkoordinatensystem. Damit wird

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Alle Elemente der mittleren Zeile sind deshalb gleich Null, weil der Ursprung O' nicht in der y -Richtung verschoben ist.

b) Teilfläche 2 (Abb. 9c)

Hier müssen nach dem Digitalisieren x - und y -Koordinaten übergeben werden. Die Matrix hat deshalb folgendes Aussehen

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Hier sind alle Elemente der dritten Zeile gleich Null, da der Ursprung O' nicht in z -Richtung verschoben ist.

c) Teilfläche 3 (Abb. 9d)

Bei dieser Teilfläche verlaufen die X_1 - und die y -Achse gegensinnig. Deshalb wird das Matrixelement $z_{2,1} = -1$. Die resultierende Matrix hat folgende Gestalt

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Da wiederum keine Verschiebung des Ursprungs O' in x -Richtung erfolgt, sind die Elemente der ersten Zeile gleich Null.

Die endgültigen Beträge der globalen Koordinaten werden dann nach Gl. (7.6) ermittelt. Entsprechend der Nullverschiebung des Ursprungs O' ist $\mathcal{U}_0$ ein Nullvektor.

Menüfeldsymbole für die Definition der Abtastebene

Diese sind in der Abb. 7 im oberen Teil des Befehlsbereiches eingetragen. Ist die Abtastebene nur parallel zu der x-y- Ebene verschoben, braucht lediglich der Befehl -STRD- angetastet zu werden. Die konstante z-Verschiebung wird durch Anfahren des Symbols -Z-CØN- und nachfolgender, vorzeichenrichtiger Eingabe des Wertes im Zahlbereich dem System übergeben. In allen anderen Fällen muß die Zuordnung durch Antippen von X1 bzw. X2 und der entsprechenden globalen Achsen spezifiziert werden. Bezieht sich dabei die Vorgabe einer konstanten Verschiebung des Ursprungs O' (-X-CØN-, -Y-CØN-, -Z-CØN-) auf eine bereits im Zuordnungsteil benutzte Koordinate, so wird diese neue Vorgabe unterdrückt. Für die Definition der Vektoren $\mathcal{U}_{D.G.}$ und $\mathcal{U}_0$ ist eine separate Zeile vorgesehen (6.te Befehlszeile von oben). Wird hier das Symbol -STRD- angefahren, haben alle drei Koordinatensysteme (P.K.S., B.K.S., D.K.S.) denselben Ursprung, nämlich die linke untere Ecke der Abtastfläche.

$\mathcal{U}_{D.G.}$ und $\mathcal{U}_0$ werden dabei automatisch zu Nullvektoren. Soll lediglich das Benutzerkoordinatensystem mit dem D.K.S. identisch sein, so ist der Befehl -DGINT- zu aktivieren. Für die Definition von $\mathcal{U}_{D.G.}$ bzw. $\mathcal{U}_0$ sind die Symbole -SETO- bzw. -XO-, -YO- sowie -ZO- anzufahren. Die Werte selbst werden über den Zahlbereich eingegeben. Schließlich können noch die Maßstäbe in den Richtungen X1 und X2 (damit auch in den zugehörigenden globalen Achsen) vorgegeben werden.

Diese Befehle sind voreingestellt, so daß alle Koordinatensysteme mit dem Digitalisier-Koordinatensystem identisch sind. Die Maßstabsfaktoren sind gleich '1'.

Bei größeren Strukturen ist es zweckmäßig und oft sogar erforderlich, diese in bestimmte, genau definierte Sektionen einzuteilen. Dadurch können einerseits Teilaufgaben arbeitstechnisch besser bewältigt werden, andererseits ist eine spätere Arbeitsteilung leichter möglich.

Bereits im Stadium der Koordinatenerfassung, wenn nicht sogar vorher geschehen, sollte diese Aufteilung vorgenommen werden. Dafür sind im Menüfeld drei Befehle vorgesehen (Zeile 3 von unten). Durch Antippen eines der Symbole werden alle nachfolgend generierten Punkte einer Punktgruppe (-GRP-) oder Unterstruktur (-UNSTR-) zugeordnet. Die betreffende Identifikationsnummer bleibt solange gesetzt, bis sie durch einen neuerlichen Befehl überschrieben wird. In der Hierarchie an erster Stelle steht die 'Idealisierung' (-IDSRG-). Sie schließt eine Anzahl von Unterstrukturen mit den zugehörigen Punktgruppen ein. Diese Einteilung wird bei allen nachfolgenden Arbeitsabläufen eingehalten; daraus resultieren dann auch die späteren Elementgruppen. Durch Benutzereingriffe können Elemente natürlich auch anderen Gruppen oder Unterstrukturen zugeordnet werden.

7.1.3 Manipulationen mit Koordinaten

Neben dem bloßen Übernehmen digitalisierter Koordinatenwerte, sollte der Benutzer diese Koordinaten aber auch noch in seinem Sinn, entsprechend strukturellen Forderungen, manipulieren können. So ist es manchmal von Vorteil, für eine Punktfolge entweder die Abszisse oder die Ordinate der einzelnen Punkte vorzugeben, oder von einem bestimmten Bezugspunkt abhängig zu machen. Der Benutzer braucht dann nur einen der dafür vorgesehenen Befehle im unteren Teil des Menüfeldes zu aktivieren (Zeile 9 von unten). Ist der letzte Punkt digitalisiert und die Folge durch -ENDC- abgeschlossen worden, werden die ermittelten Koordinatenwerte wahlweise mit den Vorgabewerten überschrieben; für die gesamte Punktfolge ist dann entweder X1 oder X2 konstant. Dies trifft dann selbstverständlich auch für die zugeordneten Koordinaten des globalen Problemkoordinatensystems zu.

Werden Punkte digitalisiert, die auf einer schräg in der Abtastebene verlaufenden Geraden liegen sollen, ist es im Normalfall nicht zu vermeiden, daß durch den Digitalisiervorgang kleine Knicke, d.h. Richtungssprünge, in dieser Geraden entstehen. Um diese Schwierigkeiten zu um-

gehen, kann vom System gefordert werden, eine Anzahl von Punkten koordinatenmäßig so auszugleichen, daß sie tatsächlich auf einer Geraden liegen (-GRD1-). Die Koordinaten des ersten und letzten Punktes definieren die Geradengleichung. Mit Hilfe der Abszissen der digitalisierten Punkte können dann auch die zugehörigen Ordinaten leicht berechnet werden. Die ursprünglichen Abstände der Punkte untereinander ändern sich dabei kaum. Ist es aber erforderlich, eine Punktfolge äquidistant auf eine derartige schräge Gerade zu verteilen, muß ein anderer Befehl im Menüfeld aktiviert werden (-GRD2-). Die Anzahl der Punkte wird ermittelt und ähnlich wie bei -GRD1- die äquidistante Verteilung vorgenommen. Ein analoges Verfahren eignet sich auch für den Koordinatenausgleich mittels Parabeln n-ter Ordnung. Dieses ist im vorliegenden Interpretationsprogramm ebenfalls eingebaut.

Oft können durch geschicktes Ausnutzen von Symmetriebedingungen viele Arbeitsgänge eingespart werden. In der Abtastebene kommen Symmetrien bezüglich der Achsen X_1 , X_2 (oder Parallelen), einer schräg in der Ebene liegenden Geraden oder eines Punktes in Frage. In dem betreffenden Punkt wird ein Koordinatensystem (x_s, y_s) aufgespannt; seine Achsen sind parallel zum System O'' (X_1, X_2). Im Raum sind die Gebilde häufig zu einer der drei Koordinatenebenen symmetrisch. Nach Definition der ebenen Symmetriebedingungen über das Menüfeld werden zunächst die entsprechenden Punkte angefahren, bis das Ende der Punktfolge durch -ENDS- angegeben wird. Danach erfolgt die Zuordnung der Symmetriepunkte und anschließend kann weitergearbeitet werden. Für Symmetrie im Problemkoordinatensystem erfolgt die Berechnung der Symmetriepunkte erst nach Abschluß der Koordinatenermittlung.

Schließlich sind noch einige Befehle zur Manipulation der Punktnummer in das Menüfeld eingetragen. Grundsätzlich sollte der Benutzer durch eine sinnvolle Reihenfolge der angefahrenen Punkte bereits hier auf die spätere Bandstruktur der Gesamtsteifigkeitsmatrix Einfluß nehmen, insbesondere dann, wenn kein spezielles Programm zum Umordnen der

Knotenpunkte vorhanden ist. Beim Übergang von einer Gruppe zur anderen kann die Anfangspunktnummer neu gesetzt oder aber aus der vorhergehenden Gruppe übernommen werden. Soll wieder mit der Nummer '1' angefangen werden, so ist der Befehl -PNR=1- zu aktivieren.

Selbstverständlich sind während des gesamten Digitalisierungsprozesses auch Korrekturen möglich. Dies geschieht dann durch Antippen einer beliebigen Position in der Korrekturzeile. Daraufhin wird dann immer der zuletzt eingegebene Befehl rückgängig gemacht. Danach kann ein neuer Befehl vorgegeben und der Prozeß fortgesetzt werden.

7.1.4 Gerätesteuerung

Diese geschieht durch die Befehle in den beiden untersten Zeilen des Menüfeldes. Die Betriebsart entscheidet darüber, welcher zusätzliche Datenträger neben dem Zeilendrucker benutzt wird. Im on line Betrieb wird das meistens eine Magnetplatte, im off line Betrieb dagegen ein Lochstreifen, ein Stapel Lochkarten oder ein Magnetband sein. Dies wird aber intern durch die jeweilige Gerätekonfiguration entschieden. Das Arbeitsende oder die Übergabe der Kontrolle an ein anderes Gerät werden durch die Befehle in der untersten Zeile erreicht.

7.2 Einsatz des aktiven Bildschirmgerätes

7.2.1 Allgemeine Bemerkungen zu geometrischen Gebilden

Bei Finite-Element-Rechnungen handelt es sich im Normalfall um Nachrechnungen bereits erstellter oder wenigstens genau definierter Strukturen. Die Berechnungsgrundlage wird deshalb eine Konstruktions- oder zumindest eine Vorkonstruktionszeichnung sein. Liegt der letztere Fall vor, müssen mindestens die Hauptabmessungen des Bauteils exakt eingetragen sein. Der Berechnungsingenieur muß sich nun an Hand dieser Arbeitsvorlage die Koordinaten der Knotenpunkte verschaffen. Geschieht dies nicht mit einem Digitalisiergerät, so müssen sie durch Ausmessen der Zeichnung bestimmt werden. Dieser Vorgang ist natürlich sehr mühsam und zeitraubend. Besser ist es, die Koordinaten mit einem Punktgenerator halbautomatisch zu ermitteln. Entscheidend für die Effektivität und Flexibilität eines derartigen Programmsystems sind Art und Anzahl der implementierten Geometrieprogramme, welche die eigentliche Koordinatenberechnung vornehmen. Im folgenden Abschnitt sollen die Gesichtspunkte, die hier zur Auswahl der Standard-Geometrieprogramme geführt haben, etwas näher erläutert werden.

Beliebig mehrfach gekrümmte Oberflächen, wie sie beispielsweise die Beplankungen von Flugzeug- oder Schiffsrümpfen darstellen, sollen in diesem Zusammenhang unberücksichtigt bleiben. Derartige Geometrien werden im Normalfall sowieso mit komplexen Interpolationsprogrammen (Strakprogrammen) ermittelt. Durch Eingriffe in diese Programme können dann auch die Knotenpunkte für FEM-Rechnungen an beliebigen Stellen der Oberfläche definiert werden. Es geht hier vielmehr um kleinere, überschaubare Bauteile, deren Gestaltung noch elementaren Berechnungen aus der analytischen Geometrie zugänglich ist. Diese Auflösung in elementare, geometrische Gebilde entspricht der Umkehrung des Konstruktionsvorganges am Zeichenbrett. Dort werden z.B. zwei auseinanderliegende Punkte in einer Ebene durch eine Strecke verbunden; hier sucht man eine gewisse Anzahl von Zwischenpunkten auf der betreffenden Strecke koordinatenmäßig zu

lokalisieren. Den beiden Tätigkeiten gemeinsam ist die Bezugnahme auf zwei ausgezeichnete Punkte, nämlich Anfangs- und Endpunkt der Strecke. Diese beiden Punkte können als Teil einer sog. Basisgeometrie betrachtet werden. Darunter soll eine Punktmenge verstanden werden, die ausreicht, die Kontur des betrachteten Bauteils genügend genau zu beschreiben. Für die spätere Generierung von Zwischenpunkten ist diese Basisgeometrie von entscheidender Bedeutung. Mit wachsender Unregelmäßigkeit eines Bauteiles steigt die Anzahl der Punkte der Basisgeometrie entsprechend an; ein regelmäßiges Strukturteil wird eine geringere Zahl von Basispunkten benötigen. Diese Punkte sind später auch die Eingabeparameter für die Geometrieprogramme.

Besonders häufig sind folgende Geometrieelemente auf einer Konstruktionszeichnung vorzufinden:

- Flächen (ebene Blechfelder)
- Geraden oder Kurven als äußere Begrenzung einer Fläche
- Geraden oder Kurven als Trennungslinie von Teilbereichen
- Kreise und Teile von Kreisen (Bohrungen und 'Radien')
- einfache Kurven (Parabeln n-ter Ordnung)
- Tangenten an Kreise
- Schnittpunkte von Geraden
- spezielle Referenzpunkte

Diese Zusammenstellung ist sicher nicht vollständig. Sie kann aber gut als Richtlinie für die Auswahl der Standard-Geometrieprogramme benutzt werden.

7.2.2 Standard-Geometrieprogramme

Nach obigen Gesichtspunkten wurde eine Zahl von Standard-Geometrieprogrammen ausgewählt. Es ist zweckmäßig, diese Programme je nach Aufgabe in Gruppen einzuteilen. Die erste Gruppe enthält Routinen mit denen Zwischenpunkte bei flächenhaften Gebilden generiert werden können. Sollen neue Punkte auf Geraden oder Kurven ermittelt werden, eignet sich dafür ein Programm aus der zweiten Gruppe. Die letzte Gruppe schließlich enthält die Programme zur Generierung von Einzelpunkten. Neben diesen elementaren Geometrieprogrammen sind noch einige Routinen eingefügt, bei denen die

Zwischenpunkte nach dem isoparametrischen Konzept (8,22) berechnet werden.

'Flächenprogramme'

Mit diesen Programmen können beliebig viele Zwischenpunkte in einer definierten Ebene berechnet werden. In einem durch vier Randpunkte festgelegten Bereich werden die neuen Punkte durch Schnitte von Geraden sequentiell ermittelt (Abb. 10). Zunächst werden die beiden Randlinien 1-2 und 3-4 entsprechend der Vorgabe in Zwischenpunkte unterteilt und korrespondierende Punkte durch Geraden verbunden. Danach folgt die Einteilung der Seiten 2-3 und 1-4 in analoger Weise. Wieder werden die Verbindungslinien gezogen. Die Schnittpunkte der beiden Geradenscharen definieren die Zwischenpunkte im Innern des Bereiches. Manchmal ist es von Vorteil, im Inneren eine äquidistante Aufteilung zu haben. Das kann leicht dadurch erreicht werden, daß die oben definierten Geradenscharen in zwei Parallelenscharen übergehen und die Schnittpunkte immer den gleichen Abstand voneinander haben.

'Linienprogramme'

Hier gestaltet sich die Berechnung neuer Punktkoordinaten relativ einfach, obwohl die Anwendung nicht unbedingt auf die Ebene beschränkt ist. Die Parameterdarstellung der Geraden eignet sich sehr gut für eine derartige Punktgenerierung.

$$u = u_1 + (u_2 - u_1) \cdot t$$

Durch Verändern des Parameters t kann nun jeder beliebige Punkt zwischen P_1 und P_2 ermittelt werden. Für zwei Sonderfälle von Kurven wurden ebenfalls die Generierungsvorschriften eingebaut: Berechnung der Koordinaten von Punkten auf einem Kreisbogen und auf einer Parabel n -ter Ordnung. Diese beiden Teilprogramme sind allerdings nur bei ebenen Gebilden anwendbar.

'Punktprogramme'

Hier wird der neue Punkt durch Schnitt von zwei definierten

Kurven generiert. Zum einen können dies zwei Geraden sein, oder aber der Schnittpunkt von einer Geraden mit einer Kurve wird als neuer Punkt benutzt. Auch kann das Lot in einem Fußpunkt errichtet und zum Schnitt mit einer Geraden gebracht werden.

Schließlich stehen noch einige Hilfsroutinen zur Verfügung, z.B. für die Ermittlung der Steigung oder des Achsenabschnittes einer Geraden. Diese brauchen aber nicht weiter erläutert zu werden, da sie ohne weiteres nachvollzogen werden können.

7.2.3 Das isoparametrische Konzept

Für die Generierung von Knotenpunkten hat sich auch das isoparametrische Konzept bestens bewährt⁽⁸⁾. Vor allem deshalb, weil es ohne Einschränkung sowohl in der Ebene, als auch im Raum benutzt werden kann. Es wird hierbei jeder Punkt im inneren eines Bereiches durch sog. 'Randfunktionen' (shape-functions) ermittelt. Diese verknüpfen die dimensionslosen Koordinaten ξ und η mit den Randpunktkoordinaten des Bereiches. Ursprünglich wurden diese Punkte im Inneren als Stützwerte bei der numerischen Integration der Steifigkeitsmatrix benutzt. Hier werden sie nun einfach zu den neuen Zwischenpunkten. Die Abb. 11 zeigt die drei einfachsten Typen dieser isoparametrischen Familie mit 3, 4 und 8 Randpunkten. Wird die Anzahl dieser Punkte erhöht, dann kann auch der Grad der Randfunktion entsprechend erhöht werden. Damit können dann Bereiche mit beliebig geformten Randkurven nachgebildet werden. Vorteilhaft wirkt sich das aus, wenn die Randkurven unterschiedlich starke Krümmungen aufweisen. Die Randpunkte können dann in diesen Abschnitten konzentriert werden. Da die Punkte im Inneren wiederum von der Lage der Randpunkte abhängen, werden sich entsprechend viele Punkte an diesen Stellen ansammeln, d.h. die Krümmungen werden qualitativ auch in das Innere des Bereiches übertragen. Diese Punktanhäufung zieht dann auch eine Konzentration der finiten Elemente nach sich, wodurch der Spannungsverlauf gut wiedergegeben wird.

'Degenerierte' isoparametrische Bereiche

Nicht immer können gerade die beschriebenen Viereckbereiche

zur Generierung von Punkten benutzt werden. Sind z.B. nur die Randpunkte für einen dreieckigen Bereich vorgegeben, muß auch eine Berechnung möglich sein. Dies wird aber leicht dadurch erreicht, indem man zwei benachbarte Randpunkte eines Vierecksbereichs programmintern gleichsetzt. Die Berechnung erfolgt dann automatisch für den so spezifizierten Dreiecksbereich. Ebenso ist es möglich, bei acht Randpunkten drei davon zusammen fallen zu lassen, um so ein krummlinig berandetes Dreieck mit Zwischenpunkten zu versehen.

7.2.4 Hierarchie der Geometrieprogramme

Organisatorisch sind die Geometrieprogramme entsprechend ihrer Bedeutung in eine hierarchische Struktur eingeordnet (Abb. 12). An erster Stelle stehen die Programme, die der Benutzer durch eine Lichtstiftaktion direkt aktivieren kann. Dies sind vor allem die Routinen, die als Eingabeparameter die Berandungspunktindizes verlangen; sie sind hier als Berechnungsprogramme bezeichnet. Die höheren Geometrieprogramme stehen an zweiter Stelle und können von jedem Berechnungsprogramm aufgerufen werden. Einige sind auch direkt durch eine Lichtstiftaktion aktivierbar, ihre überwiegende Funktion besteht aber in der Berechnung von Hilfswerten. An letzter Stelle schließlich stehen die niederen Geometrieprogramme oder Hilfsroutinen. Zu ihnen hat der Benutzer keinen Zugriff. Sie haben untergeordnete Bedeutung und liefern lediglich Werte zur Weiterverarbeitung.

7.2.5 Datenorganisation bei der Punktgenerierung

Die vom Eingabeprozessor übernommenen Koordinaten der Basispunkte werden mit einem Index versehen und im Vorgabespeicher abgelegt. Werden nun Randpunkte eines Geometriebereiches definiert, so werden die Punktkoordinaten an Hand des Punktindex aus dem Vorgabespeicher ausgelesen und dem Berechnungsprogramm übergeben. Die neuen Koordinaten wer-

den in einem Koordinatenspeicher abgelegt. Ihre Numerierung erfolgt nach einer vorgegebenen Systematik, die der Benutzer durch die Reihenfolge bei der Eingabe der Randpunkte beeinflussen kann. Einige der generierten Punkte sind mit Vorgabepunkten identisch, nämlich die Randpunkte. Es ist zweckmäßig, trotz der neu berechneten Koordinatenwerte, die Vorgabewerte den betreffenden Punkten wieder zuzuordnen. Dadurch wird sicher gestellt, daß die Koordinaten der Basispunkte unverändert erhalten bleiben. Die Abb. 13 zeigt die Organisation der Koordinaten und Punktnummern vor und nach der Generierung von Zwischenpunkten. Sind zusätzlich die Punktnummern auf dem Schirm dargestellt, so kann dies jetzt noch zu Mißverständnissen führen, z.B. könnte die Punktnummer '5' eines Vorgabepunktes auch als Nummer eines neuen Punktes erscheinen. Um dieses zu verhindern, werden nach jedem Berechnungsschritt die Nummern der Vorgabepunkte um den Betrag der höchsten neuen Punktnummer erhöht.

7.2.6 Der Generierungsprozeß

Hier werden einige Tätigkeiten des Benutzers bei der interaktiven Punktgenerierung beschrieben. Es stehen ihm alle Menüfeldsymbole und die ausgezeichneten Punkte der Basisgeometrie zur Verfügung. Es müssen aber auch während des gesamten Prozesses die Erfahrungen und Kenntnisse des Benutzers in jeden Arbeitsgang mit einfließen. Nur dadurch kann die Punktbelegung strukturellen Forderungen optimal angepaßt werden. Der Berechnungsingenieur legt die Anzahl der Punkte an bestimmten Stellen fest und sollte dabei auch schon die diskretisierte Struktur vor Augen haben. Er entscheidet sich nun für ein bestimmtes Berechnungsprogramm aus dem Menüfeldangebot und spezifiziert den Bereich durch Vorgabe der Berandungspunkte. Die Anzahl der neuen Punkte wird durch die Unterteilungen von zwei Randlinien des Bereiches festgelegt. Daraufhin werden die Zwischenpunktkoordinaten automatisch berechnet, mit einer Nummer versehen und in den Bereich eingeordnet. Ist der Benutzer mit der Lage oder Anzahl der neuen Punkte nicht zufrieden,

kann er entweder alle im vorangegangenen Schritt generierten Punkte löschen, oder nur ganz bestimmte Punkte entfernen. Besonders einfach ist es, den Bereich von allen neu generierten Punkten zu reinigen. Dazu braucht nur das Lichtzeichen -LOESHEN- aktiviert zu werden. Dann verschwinden alle im letzten Berechnungsgang ermittelten Punkte vom Schirm und werden auch intern entfernt. Die Basispunkte sind von dieser Aktion nicht berührt. Besonders leicht gestaltet sich obiges Verfahren, wenn vor jedem neuen Berechnungsgang das 'alte' Strukturbild auf einen externen Speicher transferiert wird und bei Bedarf jederzeit von dort zurückgeholt werden kann. Natürlich ist es auch möglich, separate Punkte durch Eingabe der Koordinaten über die alpha-numerische Tastatur zu generieren. Dann müssen die Koordinaten aber im Global-Koordinatensystem vorgegeben werden. Ebenso einfach können Koordinaten von bereits vorhandenen Punkten geändert werden. Der Punkt wird durch Antippen mit dem Lichtstift identifiziert und über die Tastatur werden dann die neuen Koordinatenwerte zugeordnet. Von großer Bedeutung bei Strukturberechnungen nach der Methode der finiten Elemente ist auch die Punktnummerierung oder aber die Reihenfolge der Punkte im Koordinatenspeicher. Durch ungünstige Nummerierung kann der Auflösungsprozeß der Gesamtsteifigkeitsmatrix erheblich beeinflußt werden. Hier hat der Berechnungsingenieur sowohl im Stadium der Koordinatenerfassung mit dem Digitalisiergerät, als auch während der Arbeit am Punktgenerator eine wichtige Aufgabe zu erfüllen. Er sollte darauf achten, daß allzu große Indextdifferenzen in der Punktreihenfolge vermieden werden. Speziell im Punktgenerator, wo die Koordinaten blockweise berechnet werden, werden die Indizes vom Programm festgelegt. Trotzdem kann der Benutzer die Reihenfolge der Punkte beeinflussen, da die Systematik in allen vorliegenden Berechnungsprogrammen dieselbe ist. Grundsätzlich erhält derjenige Punkt den niedrigsten Folgeindex, der dem ersten angetippten Randpunkt am nächsten liegt (Abb. 14a). Bei zwei angrenzenden Bereichen, wie in der Abb. 14b

dargestellt, werden die Punkte auf der Trennungslinie nicht mehr neu ermittelt und erhalten deshalb auch keine neuen Indizes. Deshalb erhält der Punkt '26' den nächsten Folgeindex. Ähnlich wie bei der Elementbeschreibung ist es damit auch hier sinnvoll, einen bestimmten Umlaufsinn bei der Bereichsdefinition einzuhalten. Werden Einzelpunkte ermittelt und in eine Punktgruppe eingefügt, kann der Index entweder sequentiell zugewiesen oder ein dem Bereich angepaßter Index definiert werden. Die restlichen Punkte der Gruppe erhalten dann entsprechend höhere Indizes. Die noch erforderlichen Freiheitsgrade der Strukturknotenpunkte brauchen bei der Benutzung des Programmsystems DEM (27) nicht vorgegeben zu werden. Dort werden sie in einem besonderen Programmabschnitt abhängig von den ihnen zugeordneten Steifigkeitswerten ermittelt.

Mit den hier vorgestellten Geometrieprogrammen ist es bereits möglich, das Punktnetz entsprechend konstruktiven Erfordernissen zu verfeinern oder zu vergrößern. Manchmal ist es vorteilhaft, diese Veränderung in der Punktbelegung von einem separaten Programm halbautomatisch vornehmen zu lassen. Im vorliegenden Fall wird für flächenhafte Gebilde ein geradlinig begrenztes Viereck als Grundbereich definiert. Auf jeder Randlinie kann eine andere Unterteilung vorgegeben werden. Zunächst wird ein gedachter Mittelpunkt festgelegt. Dieser Punkt wird als Schnittpunkt der Verbindungslinien von jeweils zwei gegenüberliegenden Seitenmittelpunkten gefunden. Danach werden in den so entstehenden Unterbereichen die Koordinaten der neuen Punkte entsprechend dem Grundverfahren beim isoparametrischen Viereckbereich berechnet. Die Anzahl der Punkte richtet sich nach der Vorgabe auf den Randlinien des Gesamtbereiches.

8. Generieren von finiten Elementen

8.1 Repräsentation von Spannungszuständen

Finite Elemente repräsentieren in einem definierten Volumenbereich einen bestimmten Spannungszustand. Ähnliche Annahmen und Vereinfachungen wie in der Kontinuumsmechanik, führen zu einem zu linien- bzw. flächenartigen Berechnungsmodellen, zum anderen resultieren daraus ein- bzw. zweidimensionale Spannungszustände. Dem Ingenieur geläufiger sind die Bezeichnungen Stab-, Scheiben- und Biegespannungszustand. Die Auswahl der Elemente bei speziellen Problemen erfolgt dann auch an Hand dieser Einteilung. Große Programmsysteme, wie ASKA, enthalten umfangreiche Elementbibliotheken. Damit kann fast jeder in einer Struktur denkbare Spannungszustand nachgebildet werden. In Problemprogrammen mittlerer Größe sind weitaus weniger Elementtypen eingebaut, die aber zumindest folgende elementare Spannungszustände repräsentieren:

- | | |
|-----------------|--|
| Stabelement | : Zug-/Druckspannungen in Richtung der Stabachse |
| Biegeelement | : Biegespannungen bezüglich zweier Trägheitsachsen; Torsionsspannungen in der Querschnittsebene, Zug-/Druckspannungen in Richtung der Balkenlängsachse |
| Scheibenelement | : zweiachsiger Spannungszustand mit Normal- und Schubspannungen in der Scheibenebene |
| Plattenelement | : wie Scheibenelement, zusätzlich Biegespannungsanteile nach der Kirchhoff'schen Plattentheorie |

Einfache Volumenelemente wie z.B. Tetraederelemente mit vier Knotenpunkten vervollständigen eine derartige Standardbibliothek.

8.2 Auswahl von Standard-Elementtypen

Eine Analyse von ca. 150 FEM-Rechnungen bei VFW-Fokker zeigt deutlich, welche Elementtypen bevorzugt benutzt wer-

den (Abb. 15). In dieser Aufstellung sind keine Volumenelemente enthalten, da sie erwartungsgemäß sehr selten gebraucht werden. Meistens sind dann die einfachen Tetraederelemente auch nicht mehr genau genug, um diese verwinkelten dreidimensionalen Spannungszustände zu erfassen.

In den Elementgenerator sind deshalb vorerst nur die folgenden sieben Standard-Elementtypen eingebaut worden:

- a) drei Scheibenelemente (Dreieck-, Viereck-, Rechteckscheibe)
- b) Stabelement
- c) Biegeelement
- d) zwei Plattenelemente (Dreieck- und Rechteckplatte)

Die Namen der ausgewählten Elementtypen stehen an oberster Stelle im Menüfeld. Die notwendigen elementspezifischen Parameter (Anzahl der Knotenpunkte und Querschnittswerte) werden beim Aktivieren des Namens mit dem Lichtstift aus einer Parameterliste abgerufen.

8.3 Integration anderer Elementtypen

Da für jeden Typ ein separates Programmsegment vorgesehen ist, können auch andere Elementtypen mit geringem Aufwand eingebaut werden. Dazu sind lediglich folgende Erweiterungen notwendig:

- Definition des Namens im Menüfeld
- Vorgabe der Anzahl der elementspezifischen Parameter
- Verbindungsvorschrift für die Knotenpunkte

8.4 Der Generierungsprozeß

Für die Elementgenerierung steht ein separates, primäres Overlay mit den entsprechenden sekundären Overlay's zur Verfügung.

Zunächst wird das Menüfeld am rechten Bildschirmrand aufgebaut und zusammen mit den Informationsstreifen am oberen und unteren Rand des Schirmes für den Dialog vorbereitet. Anschließend werden die vom Eingabeprozessor oder

vom Punktgenerator übernommenen Knotenpunkte auf dem Schirm dargestellt. Jeder Lichtpunkt repräsentiert dabei ein Koordinatentripel (x,y,z) . Die Lichtpunkte selbst sind mit einem internen Zeiger versehen, so daß beim späteren Antippen mit dem Lichtstift der Index des Punktes und damit auch seine Koordinaten wieder identifiziert werden können. Das System tritt danach in eine Warteschleife ein und gleichzeitig wird der Benutzer durch ein blinkendes Lichtzeichen am linken, oberen Bildschirmrand zu einer Aktion aufgefordert. Es kann vorausgesetzt werden, daß der Berechnungsingenieur über die konstruktiven Eigenarten und die äußeren Belastungen des Bauteils informiert ist, d.h. er kann sich ein Bild über den Kraftfluß in der Struktur machen. Mit Hilfe dieser Informationen entscheidet er dann, welche Elementtypen an bestimmten Stellen der Struktur zur Diskretisierung herangezogen werden. Diesen Typ wählt er aus dem angebotenen Menü aus. Jedem Typ ist eine genau spezifizierte Anzahl von Knotenpunkten zugeordnet. Er definiert nun durch Antippen der Lichtpunkte mit dem Lichtstift diese Punkte und beschreibt so das Element. Sind alle notwendigen Knotenpunkte auf diese Weise dem System übergeben worden, werden die Punkte in der angegebenen Reihenfolge durch Linien miteinander verbunden und auf dem Schirm dargestellt. Gleichzeitig wird dem Element eine interne Nummer zugeordnet. Diese dient zum einen dazu, das Element auf dem Schirm bei späteren Aktionen zu identifizieren, zum anderen den zugehörigen 'Elementsatz' auf der Magnetplatte zu lokalisieren. Dort stehen nämlich nach der Generierung alle für eine spätere Weiterverarbeitung notwendigen Informationen über das Element, wie interne Elementnummer, Elementtyp, Knotenpunkte usw. Die Abb. 16 zeigt wie ein derartiger 'Elementsatz' auf der Magnetplatte abgelegt ist. Die Elementdatei wird zwar sequentiell aufgebaut; es kann jedoch jeder einzelne 'Satz' im direkten Zugriff von der Platte abgerufen werden. Das ist beispielsweise dann notwendig, wenn ein bestimmtes Element vom Bildschirm gelöscht wird, es aber nach wie vor als 'totes' Element auf der Platte weiter bestehen

bleiben soll. Dann wird einfach ein Zeiger gesetzt, der ein erneutes Darstellen auf dem Schirm unterbindet. Natürlich könnte jetzt jedes Element separat durch Antippen seiner Berandungspunkte generiert werden. Man kann sich aber leicht vorstellen, daß dieses Verfahren sehr zeitraubend und wenig wirtschaftlich ist, ganz abgesehen von der physischen Belastung des Benutzers. Einzelelemente sollten deshalb nur generiert werden, wenn es gilt, an bestimmten Stellen der Struktur zusätzliche Elemente einzufügen, oder wenn Elemente fehlerhaft sind und korrigiert werden müssen. Vorteilhafter ist es, die Elemente blockweise zu generieren. Dabei werden die laufenden Indizes der Knotenpunkte in eine 'Bereichsmatrix' **B** eingebracht und dann automatisch, jedoch typabhängig, den verschiedenen Elementen zugeordnet. Allerdings müssen bei diesem Verfahren gewisse Eingaberichtlinien beachtet werden. Die Generierung der Elemente in dem so definierten Bereich erfolgt dann auch ohne Einfluß von Seiten des Benutzers. Die drei in Abb. 17 dargestellten Möglichkeiten sollen im Folgenden zum besseren Verständnis etwas ausführlicher behandelt werden:

- a) Die Abb. 17a zeigt einen Bereich mit beliebigen Indexdifferenzen $\Delta I_{i,j}$ und $\Delta J_{i,j}$. Hier aktiviert der Benutzer das Lichtzeichen -AUTOMAT-. Daraufhin verläßt das System die Warteschleife und verzweigt in ein sekundäres Overlay und wartet dort auf die Definition der Knotenpunkte. Der Benutzer tippt in fortlaufender Reihenfolge Knotenpunkte in 'Richtung' 1 an (Indexdifferenzen $\Delta I_{i,j}$) und füllt damit intern eine Spalte der Bereichsmatrix mit den Indizes dieser Knotenpunkte. Der Endstand des Zählers N1 in 'Richtung' 1 ist erreicht, wenn das Lichtzeichen -FIX- aktiviert wird. Alle folgenden Spalten werden auf die gleiche Weise aufgefüllt. Allerdings braucht der Zähler N1 nicht mehr gesetzt werden. Ist der letzte Punkt definiert, so wird das dem System durch das Lichtzeichen -FIXEND- mitgeteilt. Gleichzeitig wird der

Fehler NG gesetzt, d.h. **B** ist eine (NixN) Matrix. Die Bereichsmatrix wird nun so ausgewertet, daß entsprechend dem Elementtyp, die Indizes aus der Matrix abgezogen, Punkte und Koordinaten identifiziert und in den 'Elementsatz' eingeschrieben werden. Das gesamte Informationsraster für die Magnetplatte entspricht im Aufbau dem bei den Einzelelementen.

- b) Obiges Verfahren kann nun dahingehend modifiziert werden, daß nicht mehr alle Punkte angetippt werden müssen, sondern lediglich Anfangs- und Endpunkt einer Punktfolge (Abb. 17b). Um in diesen Programmteil zu verzweigen, ist vorher das Lichtzeichen -REGELM1- zu aktivieren. Die Anzahl der Punkte in dieser Folge wird dann automatisch aus der Differenz der beiden oben genannten Punktindizes berechnet. Voraussetzung dabei ist allerdings, daß die Indicedifferenzen $\Delta I_{1,2}$ von einem Zwischenpunkt zum anderen konstant und gleich '1' sind, d.h. die Punkte müssen entweder im Eingabeprozessor nacheinander liegen, oder im Punktgenerator nacheinander generiert worden sein. Hier braucht dann lediglich das Lichtzeichen -FIXEND- angetippt zu werden, um die Eingabe abzuschließen.

- c) Bei konstanten Indicedifferenzen $\Delta I_{1,2}$ ungleich eins bietet sich ein drittes Verfahren an (-REGELM2-). Man braucht nur einen zusätzlichen Punkt anzutippen, um die Differenz festzulegen, d.h. nach dem Anfangspunkt folgt dieser Hilfspunkt. Die Anzahl der Punkte wird wieder automatisch ermittelt. Auch hier ist die Eingabe mit dem Lichtzeichen -FIXEND- beendet. (Abb. 17c).

Nachdem alle Elemente des Bereichs intern generiert worden sind, erscheinen sie auf dem Schirm. Danach kehrt die Kontrolle wieder in das primäre Overlay zurück und das System betritt die Warteschleife. Nun kann der Benutzer wieder in den Dialog eintreten. Der Elementtyp ist nach wie vor noch gesetzt, d.h. er könnte zu Idealisierungsprozess fortfahren. Er kann aber auch einen anderen Typ auswählen oder eines der zusätzlichen Lichtzeichen des Menüfeldes aktivieren. Sind schon viele Elemente generiert worden, ist es manchmal von

Vorteil, den Bereich der noch diskretisiert werden soll, allein auf dem Schirm darzustellen, d.h. eine bestimmte Abschnittsvergrößerung vorzunehmen. Auch durch eine neue Perspektive kann das Bild oftmals übersichtlicher werden. Korrekturen an den generierten Elementen können ohne Schwierigkeiten vorgenommen werden. So kann es z.B. erforderlich sein, eine bestimmte Anzahl von Elementen zu löschen. Es brauchen dann nur das Lichtzeichen -LOESCHEN- sowie das erste und letzte Element der Folge angetippt zu werden; die Elemente werden vom Schirm gelöscht und in der Elementdatei als 'tote' Elemente deklariert.

8.5 Zuweisen von Querschnittswerten

Neben der Beschreibung der Elementkontur müssen den Elementen aber auch noch Querschnittswerte mitgegeben werden, d.h. Angaben, die für die Berechnung der Elementsteifigkeitsmatrix erforderlich sind, z.B. Blechdicke und Trägheitsmomente. Diese Daten können auf unterschiedliche Weise zugeordnet werden:

a) Zuordnung während des Generierungsprozesses im Elementgenerator

Die Querschnittswerte werden hier entweder manuell über die alpha-numerische Tastatur separat für jedes generierte Element eingegeben oder aber vollautomatisch aus einer Datei mit Standard-Querschnittswerten abgerufen. Das erste Verfahren kann recht umständlich sein; insbesondere dann, wenn eine größere Anzahl von Elementen halbautomatisch generiert worden ist. Meistens lassen sich aber zumindest für Teilbereiche repräsentative Querschnittswerte finden, die dann den Elementen automatisch zugewiesen werden. Besonders effektiv lassen sich beide Verfahren in der Weise verknüpfen, daß zunächst allen Elementen die Standardwerte zugeordnet und anschließend lediglich bei den Elementen, die abweichende Querschnittswerte erfordern, Modifikationen vorgenommen werden. Voraussetzung dabei ist, daß die Standarddatei bereits im Lineabeprozessor aufgebaut oder aber nachträglich vom Benutzer manuell erstellt worden ist. Ist

die Datei zunächst noch leer, dann fehlt auch das Lichtzeichen -STANDRD- im Menüfeld des Elementgenerators, d.h. es kann kein Zugriff auf die Standardwerte erfolgen. Der Benutzer kann aber jederzeit über das Lichtzeichen -DEFQWRT- auf die Leerdatei zugreifen, die geometrischen Daten durch Eingabe über die Tastatur generieren und die Datei damit für den späteren Gebrauch vorbereiten. Auf diese Weise lassen sich dann auch die evtl. vorgegebenen Standardwerte beliebig verändern.

b) Zuordnung in einem separaten Teilprogramm

Zieht es der Benutzer vor, die Elemente zunächst ohne Querschnittswerte aufzubereiten, so kann er nach Verlassen des Elementgenerators in einen Programmteil verzweigen, wo er einerseits die Diskretisierung noch einmal kontrollieren, andererseits Manipulationen mit Querschnittswerten vornehmen kann. Im Menüfeld dieses Programmes sind ebenfalls alle Elementtypen aus dem Elementgenerator eingetragen, allerdings hier zum Zweck, selektiv alle Elemente bestimmter Typen auf dem Schirm darzustellen. Werden die Lichtzeichen -ELTYPEN-, die betreffenden Elementarten, sowie -ENDELT- angefahren, erscheinen lediglich die ausgewählten Elemente auf dem Schirm. Alle Elemente anderen Typs werden dabei intern unterdrückt. Durch diese übersichtliche Darstellung können dann die Querschnittswerte bequem zugeordnet werden. Hier ist es ebenfalls wieder möglich, geometrische Daten einem Einzelelement oder ganzen Elementfolgen entweder manuell oder automatisch zuzuweisen.

c) Zuordnung in einem nachfolgenden Rechenlauf

Dieses Verfahren ist dann von Vorteil, wenn in der Idealisierungsphase die geometrischen Daten noch nicht genau bekannt sind oder wenn mit nachträglichen Änderungen gerechnet werden muß. Sind die Querschnittswerte schließlich festgelegt, werden sie in dem im vorhergehenden Abschnitt b) beschriebenen Teilprogramm den zugehörigen Elementen zugewiesen.

Für die Generierung von Querschnittswerten im on line Betrieb ist zusätzlich ein Verfahren vorgesehen, das Fließner

in Lit. 29 beschrieben und für den Interaktiven Konstruktionsplatz bereits realisiert hat. Damit können Trägheitsmomente direkt durch Abfahren der Querschnittskontur auf dem Digitalisiergerät ermittelt werden. Hier zeigt sich auch wieder, wie vorteilhaft der Verbund von Digitalisiergerät und Bildschirm sein kann. Beide Geräte können dann erst optimal entsprechend ihren unterschiedlichen Eigenschaften eingesetzt werden. Im vorliegenden Fall würde die Kontrolle an das Digitalisiergerät abgegeben, dort werden die Querschnittswerte interaktiv bestimmt und anschließend wieder am Bildschirm den betreffenden Elementen zugeordnet.

9. Optimieren der Bandstruktur der Gesamtsteifigkeitsmatrix

In dem hier vorgestellten Verfahren ist der Benutzer an keine vorgeschriebene Reihenfolge bei der Generierung neuer Knotenpunkte gebunden. Dadurch kann die Bandbreite der Steifigkeitsmatrix von der programmtechnischen Seite während des Idealisierungsprozesses kaum beeinflußt werden. Deshalb kann auch nicht vermieden werden, daß die Koordinaten geometrisch benachbarter Punkte im Koordinatenspeicher indexmäßig weit voneinander abgelegt werden. Dieses ist durch die sequentielle Abspeicherung der Punkte entsprechend ihrer Reihenfolge bei der Generierung bedingt.

Beendet der Bearbeiter die Datenaufbereitung auf der Ebene der Problembearbeitung und sind insbesondere alle Strukturknotenpunkte definiert und auch das Elementnetz vollständig festgelegt, so wird unbemerkt vom Benutzer ein Umordnungsprozeß im Koordinatenspeicher initiiert, der zu einer besseren Bandstruktur führen soll.

Für das Berechnungsprogramm DEM ⁽²⁷⁾ ist eine möglichst kleine Bandbreite anzustreben. Ausgehend von dem Verfahren von Collins ⁽³⁰⁾ werden zunächst die Knotenpunktnummer und der Punktindex voneinander getrennt, sowie alle Punkte mit einer sog. Nullwertigkeit aus dem eigentlichen Umordnungsprozeß eliminiert. Diese Trennung ist sinnvoll, da die Punktnummern, anders als die Indizes, oft auch eine kennzeichnende Aufgabe haben, indem z. B. für bestimmte Bauteile oder Teile von Bauteilen nur festgelegte Nummernfolgen vergeben werden.

Alle Eingabeparameter für den Optimierungsprozeß können den während des Generierungsprozesses im Elementgenerator gebildeten 'Elementsätzen' entnommen werden. Dort stehen für jedes Element die aktuellen Punktnummern

der Elementknotenpunkte sowie deren Indizes.

In Anlehnung an das Verfahren von Collins (30) wird hier ebenfalls im ersten Schritt die Wertigkeit der Knotenpunkte festgestellt. Diese ist identisch mit der Anzahl der Verbindungen zu den Nachbarknotenpunkten. Bereits an dieser Stelle werden allerdings hier alle Punkte mit Nullwertigkeit aus dem Prozeß eliminiert. Die Indizes dieser Punkte werden in einem separaten Speicher gesammelt, da die Punkte physikalisch vorhanden sind und aus der Punktmenge nicht verloren gehen dürfen.

Im zweiten Schritt wird die Zuordnung von Knotenpunkten zu Elementen ersetzt durch eine Verknüpfungsliste. Diese enthält alle Indizes der Knotenpunkte, die mit dem im Augenblick betrachteten Strukturpunkt über Elemente direkt verbunden sind. Die daraus berechenbare größte Indexdifferenz ist dann gleich der örtlichen Bandbreite der Steifigkeitsmatrix (wenn man von einem Freiheitsgrad pro Punkt ausgeht).

Im dritten Schritt wird nun nacheinander jeder erfaßte Knotenpunkt mit einer Wertigkeit ≥ 1 der Struktur (Unterstruktur, Gruppe) als Startpunkt für einen Umordnungsprozeß herangezogen, so daß, jeweils ausgehend vom Index '1' (für den gerade aktuellen Startpunkt), über die Wertigkeit und die Verknüpfungsliste alle Indizes in aufsteigender Reihenfolge umgeordnet werden. Die neue örtliche Bandbreite ergibt sich dabei als größte Indexdifferenz zwischen Bezugspunktindex der Liste und den bereits umgeordneten Punktindizes in der Liste. Ist diese Bandbreite größer als eine vorher ermittelte Urbandbreite, wird der Prozeß abgebrochen und ein neuer Startpunkt gewählt. Durch Wiederholen dieses Prozesses für alle Strukturpunkte wird diejenige Anordnung gefunden, welche eine günstigere Bandbreite als die Urbandbreite liefert.

An diese Reihenfolge werden die Indizes der Punkte mit Nullwertigkeit angehängt.

Auf der Basis dieser Reihenfolge werden

- die zugehörigen Punktindizes
in die 'Elementsätze' eingeschrieben
- die Koordinatentripel umgeordnet

Die dem Benutzer übergebene Datei mit den Knotenpunkten enthält somit alle Punkte in der für die Bandstruktur günstigsten Reihenfolge.

10. Anwendungsbeispiele

10.1 HeißBauge

An diesem ersten Beispiel sollen die verschiedenen Möglichkeiten des hier vorgestellten interaktiven Programmsystems etwas ausführlicher behandelt werden, insbesondere soll die Anwendung des Punktgenerators bei einem ebenen Problem demonstriert werden. Die Abb. 18 zeigt die für die Idealisierung vorgegebene Basisgeometrie mit insgesamt 28 Vorgabepunkten. Diese Anzahl reicht aus, um die äußere Kontur des Bauteils genügend genau zu beschreiben. Da zusätzlich Symmetrie zur Hochachse vorliegt, wird lediglich das halbe Bauteil diskretisiert. Die Basispunkte wurden bereits im Hinblick auf das spätere Generierungsprogramm ausgewählt. Außerdem sind an der inneren Randlinie, im Bereich der starken Krümmung, mehr Punkte konzentriert, als in anderen Zonen.

Nachdem das Bildschirmprogramm initiiert ist, erscheint zunächst ein Menü auf dem Bildschirm, wo eine gewisse Anzahl von möglichen Arbeitsabläufen angeboten wird (Abb. 19). Da im vorliegenden Fall die Anzahl der Punkte erweitert werden soll, wird die Möglichkeit, neue Zwischenpunkte zu berechnen, angewählt. Das System verzweigt danach automatisch in das Teilprogramm zur interaktiven Auswahl einer günstigen Arbeitsperspektive (Abb. 20). Nachdem dies geschehen ist, übernimmt der Punktgenerator die Basispunkte. Dort werden sie mit der vorher ausgewählten Perspektive, als aktivierbare Lichtpunkte auf dem Schirm dargestellt. Zur Generierung der neuen Zwischenpunkte bietet sich hier ein Berechnungsprogramm aus der isoparametrischen Familie an. Die Menüfeldsymbole hierfür sind an erster Stelle im Menüfeld oben rechts angeordnet. Das Programm wird nun durch Antippen des Namens aktiviert (hier -SGIS2-). Der Bereich selbst wird durch Anfahren von 8 Randpunkten mit dem Lichtstift definiert. Auf zwei der vier Randlinien muß nun noch die Anzahl der Zwischenpunkte angegeben werden. Dies geschieht durch Eintippen der Zahlenwerte über die alpha-numerische Tastatur. Ist diese Eingabe abge-

geschlossen, werden die neuen Punkte generiert und in den Bereich eingefügt. In der Abb. 21 sind diese ermittelten Zwischenpunkte des Unterbereichs 1 zusammen mit den restlichen Vorgabepunkten dargestellt. Die Abb. 23 schließlich zeigt das fertige, auf dem interaktiven Weg generierte Punktnetz mit insgesamt 100 Knotenpunkten. Deutlich erkennbar ist die Konzentration der Punkte im Bereiche der starken Krümmung. Das resultiert allerdings z.T. auch schon aus der Häufung der Vorgabepunkte an dieser Stelle. Die Lage und Anzahl der Punkte erschien ausreichend, um genügend genaue Resultate in der nachfolgenden FEM-Rechnung zu erhalten. Durch Aktivieren des Lichtzeichens -ENDOVLY- geht die Programmkontrolle an den Elementgenerator über. Da aus der Ermittlung der Knotenpunkte im Punktgenerator bereits regelmäßige Indizes ($\Delta I_{i,j} = 1$) resultieren, können die Elemente nun bequem bereichsweise generiert werden. Für diese halbautomatische Elementgenerierung wird nun das Lichtzeichen -REGELM1- angetippt. Hier wurde ausgehend vom linken oberen Anfangspunkt, alternierend jeweils ein Punkt der äußeren bzw. inneren Randlinie angetippt. Maximal können auf einer Randlinie 10 Punkte angefahren werden. Ist diese maximale Anzahl erreicht, verzweigt das Programm automatisch in ein Unterprogramm, um die Bereichsmatrix entsprechend dem vorher gewählten Elementtyp auszuwerten. Der aktive Zustand des Bildschirmsystems mit den so generierten Elementen ist in der Abb. 24 dargestellt. Die noch fehlenden Elemente können jetzt ebenfalls sehr bequem nach diesem Generierungsschema erzeugt werden. Eine nachfolgende Bereichsdefinition führt zu den Elementen in der Abb. 25. Schließlich werden noch zwei Dreieckscheibenelemente generiert. Um bequem arbeiten zu können, wurde der untere Teil der Struktur etwas vergrößert dargestellt (Abb. 26). Manchmal auftretende Schwierigkeiten bei der Identifizierung der Punkte mit dem Lichtstift können dadurch ebenfalls vermieden werden, da die Punkte dann ein größeres, nicht aktivierbares Umfeld haben. Die Kennzeichnung der Knotenpunkte durch die Punktnummer, wie in Abb. 27, ist manchmal für Kontrollzwecke nützlich.

Die Abb. 28 und 29 zeigen schließlich noch einmal die gesamte Struktur in der aktuellen und einer geänderten Perspektive. Nun lassen sich auch Modifikationen des Punkt- und Elementnetzes auf dem interaktiven Weg sehr leicht und bequem durchführen. Eine solche Alternatividealisierung mit mehr Knotenpunkten und ausschließlich Dreieckscheibenelementen zeigt die Abb. 30.

Die für die Elementsteifigkeitsmatrizen notwendigen Querschnittswerte werden zugewiesen, nachdem durch Benutzerentscheidung das entsprechende Programm aufgerufen worden ist. Aus der Abb. 31 ist ersichtlich, daß die Datei mit den Querschnittswerten lediglich als Leerdatei vorhanden war und nun interaktiv mit Zahlenwerten versehen werden muß. Da nur Dreieck bzw. Viereckscheibenelemente zur Idealisierung benutzt worden sind, genügt es, für diese Elementtypen die Querschnittswerte zu definieren. Allerdings muß noch eine Referenznummer für einen bestimmten Werkstoff spezifiziert werden. In der Abb. 32 sind alle generierten Viereckscheibenelemente und ein spezielles Menüfeld für verschiedene Arten der Zuordnung von Querschnittswerten dargestellt. Jedes Element ist mit einer Nummer versehen. Tippt man Anfangs- und Endnummer einer Serie von Elementen an, so werden die 'Elementsätze' auf der Magnetplatte lokalisiert und die Querschnittswerte abhängig vom Elementtyp vollautomatisch eingesetzt. Diese Standard- Querschnittswerte können aber jederzeit manuell überschrieben werden. Sind alle Elemente mit Querschnittswerten versehen, so wird dieser Programmteil durch Antippen von - ENDOVLY - wieder verlassen. Die Abb. 33 zeigt ein Menüfeld zur Auswahl der weiteren Schritte. Im vorliegenden Fall wurde die nächste Idealisierung bearbeitet. Sowohl die generierten Punkte, als auch die Elemente können neben der Druckerausgabe wahlweise als Kartenstapel oder Magnetbanddatei ausgegeben werden. Zusammen mit den hier noch nicht aufbereiteten Lasten bilden sie den Eingabedatensatz für ein FEM-Programm.

10.2 Teilstruktur mit Handloch

Hier wird die interaktive Datenaufbereitung an einer geometrisch relativ unregelmäßigen Struktur demonstriert. Die Abb. 34 zeigt den aus einer Gesamtstruktur herausgeschnittenen Teilbereich. Die innere und äußere Berandungslinie sind durch Vorgabepunkte definiert. Verschiedene konstruktiv erforderliche Basispunkte im Bereichsinnern sind ebenfalls eingetragen und koordinatenmäßig erfaßt. Der gesamte schraffierte Bereich, inklusive der beiden Randlinien, soll nun mit einem Punktnetz überzogen werden. Die nächste Abbildung zeigt die Punkte der Basisgeometrie im Perspektivprogramm. Danach werden sie vom Punktgenerator übernommen. Der Benutzer wird dort gerade zu einer Lichtstiftaktion aufgefordert (Abb. 36). Zunächst wird der linke Teilbereich der Struktur mit zusätzlichen Punkten versehen. Dabei werden auf der äußeren Randlinie die Punkte entsprechend der Krümmung verteilt, weiter innen liegen die neuen Knotenpunkte auf den Verbindungslinien der Basispunkte (Abb. 37). Im nächsten Schritt wird die innere Randlinie mit Punkten belegt. Auf der Abb. 38 sind alle bis zu diesem Zeitpunkt ermittelten neuen Punkte zu sehen. Die Abb. 39 schließlich zeigt das fast vollständige Punktnetz. Lediglich einige Einzelpunkte müssen noch eingefügt werden (Abb. 40). Nach geringfügigen Änderungen wird die Perspektive noch einmal geprüft (Abb. 41) und danach geht die Kontrolle an den Elementgenerator über. Bedingt durch die relativ große Anzahl von Punkten und die begrenzte Fläche des Bildschirm, ist ein übersichtliches und bequemes Arbeiten nur durch Detaildarstellungen möglich. Die Abb. 42 und 43 zeigen die Generierung von Elementen in dem optisch vergrößerten oberen Bereich der Struktur. In der Abb. 44 ist der gesamte bis dahin generierte Elementblock dargestellt. Anschließend wird der linke Bereich der Teilstruktur vergrößert und mit Elementen versehen (Abb. 45). Die beiden folgenden Abbildungen zeigen jeweils in der

Gesamtdarstellung verschiedene Stadien der Elementgenerierung. Das vollständige Elementnetz ist in der Abb. 48 dargestellt. Für Dokumentationszwecke wurde das Netz ohne Markierung der Knotenpunkte in der Abb. 49 festgehalten.

Die Abb. 50 zeigt die Lage der Knotenpunkte. Zusätzlich dargestellt sind die Indizes der Punkte, d.h. man kann deutlich die Positionen der Punkte im Koordinatenspeicher feststellen. Die Punkte '1' und '295' liegen geometrisch dicht beieinander, im Koordinatenspeicher sind sie aber 294 Plätze voneinander entfernt. Daraus resultiert eine große Bandbreite der Gesamtsteifigkeitsmatrix, wie die Abb. 51a anschaulich zeigt. Nachdem alle Elemente generiert waren, wurde eine Optimierung der Bandbreite versucht. Die maximale Bandbreite wurde dabei auf $b_{\max} = 19$ reduziert (Abb. 51b). Die neue Lage der Knotenpunkte im Koordinatenspeicher ist aus der Abb. 52 anhand der Punktindizes deutlich zu erkennen. Beim Optimierungsprozeß wurde lediglich ein Freiheitsgrad pro Punkt betrachtet. Die Erweiterung auf n -Freiheitsgrade pro Punkt ist programmtechnisch unproblematisch.

11. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren für die interaktive Datenaufbereitung bei Berechnungen nach der Methode der finiten Elemente konzipiert und für eine bestehende Gerätekonfiguration realisiert. Dabei wird ein Digitalisiergerät off line mit einem direkt an den Großrechner angeschlossenen aktiven graphischen Bildschirmgerät im Verbund betrieben.

Der Berechnungsingenieur wird von der Ausführung der Routinetätigkeiten befreit und steuert bzw. kontrolliert in einem kreativen Dialog den Prozeß der Datenaufbereitung. Durch die Verlagerung der Routinetätigkeit in den Rechner können auch sämtliche mit ihnen verbundenen Fehler vermieden werden. Hier sei insbesondere an Fehler bei der Ermittlung der Koordinaten der Knotenpunkte sowie bei der Festlegung des Elementnetzes gedacht. Treten dennoch vom Benutzer verursachte Fehler auf, so können sie, da sie optisch auf dem Bildschirm gleich erkennbar sind, sofort im nächsten Schritt durch interaktive Eingriffe korrigiert werden.

Des weiteren wird der Bearbeiter in die Lage versetzt, schnell Alternatividealisierungen zu entwerfen und zu beurteilen.

Bei der Programmentwicklung wurde besonderer Wert darauf gelegt, daß der Dialog an jeder Stelle des Systems aufgenommen oder beendet werden kann und damit auch der Prozeß der Datenaufbereitung nicht an ein starres einzuhaltendes Schema gebunden ist, obwohl dieses als ein Standardfall angeboten wird.

Ein hohes Maß an Maschinenunabhängigkeit konnte dadurch erreicht werden, daß das gesamte Programmsystem in FORTRAN IV erstellt und zusätzlich modular aufgebaut wurde.

Die Generierung von Eingabedaten für unterschiedliche FEM-Programmsysteme ist möglich. Dazu brauchen lediglich geringe Modifikationen an der programmierten Nach-

bildung der Eingabeformulare für das betreffende Programm durchgeführt werden. Für den Anwender der interaktiven Datenaufbereitung entstehen dadurch keinerlei Umstellungsprobleme, die sonst bei der Anwendung eines anderen FEM-Programmsystems öfter zu beobachten sind.

Abschließend sei bemerkt, daß diese Art der Datenaufbereitung durch den hohen Anteil an Kreativität auch eine qualitative Verbesserung der Arbeitsergebnisse erbringt, welche sehr schwer in Zahlen ausgedrückt werden kann.

Literaturverzeichnis

- (1) Argyris, J.H., Energy Theorems and Structural Analysis, a.Part I, General Theory, Aircraft Engineering, Vol. 26, 1954: Okt. pp. 347-356, Nov. pp. 383-387, 394, Vol. 27, 1955: Feb. pp. 42-58, März pp. 80-84, April pp. 125-134, Mai pp. 145-158. In Buchform veröffentlicht bei Butterworth, London, 1960; 5. Auflage Plenum Press, New York, 1971.
- (2) ASKA - Automatic System for Kinematic Analysis, User's Manual, ISD Bericht Nr. 73, April 71.
- (3) NASTRAN, The NASTRAN User's Manual (Level 15.0), Caleb W. McCormick, Ed. NASA, Scientific and Technical Information Office, 1973.
- (4) ICES-STRU DL II, The Structural Design Language, Engineering User's Manual, Bd. I und II Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge Mass., 1969
- (5) Kamel, H.A., Eisenstein, H.K., Automatic Mesh Generation in Two and Three-dimensional Inter-connected Domains. IUTAM Symposium on High Speed Computing of Elastic Structures, Liège 24./28. Aug., 1970
- (6) Frederick, C.O., Wong, Y.C., Edge, F.W., Two-dimensional Automatic Mesh Generation for Structural Analysis. Int. J. num. Meth. Engng., Vol.2, pp. 133-144, 1970.
- (7) Boisserie, J.M., Generation of Two- and Three-dimensional Finite Elements. Int. J. num. Meth. Engng., Vol.3, pp. 327-347, 1971.
- (8) Zienkiewicz, O.C., Phillips, D.V., An Automatic Mesh Generation Scheme for Plane and Curved Surfaces by 'Isoparametric' Co-ordinates. Int. J. num. Meth. Engng., Vol. 3, pp. 519-528, 1971.

- (9) Fleßner, H., Konstruieren mit Bildschirmgeräten erläutert an Beispielen aus dem Arbeitsbereich des Bauingenieurs.
VDI-Bildungswerk, Stuttgart 1972
- (10) Grieger, I., Über den Einsatz von Bildschirmgeräten bei der Berechnung von Tragwerken.
Dr. Ing. Dissertation, Stuttgart 1972
- (11) Gordon, W.J., Hall, C.A., Construction of Curvilinear Coordinate Systems and Application to Mesh Generation.
Int. J. num. Meth. Engng., Vol. 7, pp. 461-477, 1973
- (12) Bousquet, R.D., Yates, D.N., A low Cost Interactive Graphics System for Large Scale Finite Element Analyses.
Computers & Structures, Vol. 3, pp. 1321-1330
- (13) Fleßner, H., Rechnerunterstütztes Planen und Konstruieren über einen Interaktiven Konstruktionsplatz-Einführender Bericht-. Arbeitsgruppe Angewandte Informatik im Ingenieurwesen, Bericht 1/74, Bochum 74
zusätzlich: dem Autor im Juli 1974 vorgeführte Demonstrationsbeispiele.
- (14) Gorny, P., Entwurf eines Verwaltungssystems für grafische Symbole zum interaktiven Konstruieren.
Bericht 3/74, IKP, April 1974, Ruhr-Universität-Bochum
- (15) Hansmann, W., Unterprogrammsystem MENUE.
Bericht 2/74, IKP, März 1974, Ruhr-Universität-Bochum
- (16) SIPILO - Ein Bildschirmprogramm zur Datenkontrolle
Interner VFW-Bericht, 1972
- (17) Encarnacao, J., Untersuchungen zum Problem der rechnergesteuerten, räumlichen Darstellungen auf ebenen Bildschirmen.
Dr. Ing. Dissertation, Berlin 1971

- (18) Roberts, L.G., Homogenous Matrix Representation and Manipulation of n-dimensional Constructs. The Computer Display Review, C.W. Adams Associates, Inc., Cambridge Massachusetts, USA, Mai 1965
- (19) Noll, A.M., Stereographic Projections by Digital Computers. Computers and Automation, pp. 32-35, Mai 1965
- (20) Gray, S.C., Compound Data Structure for Computer-Aided Design, a Survey. Proceedings ACM National Meeting, pp. 355-365, 1967
- (21) Ahmad, S., Zienkiewicz, O.C., Irons, B.M., A Simple Matrix-Vector Handling Scheme for Three-dimensional and Shell Analysis. Int. J. num. Meth. Engng., Vol. 2, pp. 509-522, 1970
- (22) Ergatoudis, I., Irons, B.M., Zienkiewicz, O.C., Curved 'Isoparametric', Quadrilateral Elements for the Finite Element Method. Int. J. Solids Structures, Vol. 4, pp. 31-42, 1968
- (23) _____, Seminarvorträge 'Digitalisierung von Analogwerten', Hamburg, 15./16. Mai 1972
- (24) Steinmüller, G., Restrictions in the Application of Automatic Mesh Generation Schemes by 'Isoparametric' Co-ordinates. Int. J. num. Meth. Engng., Vol. 8, pp. 289-294, 1974
- (25) Cook, W.A., Body Oriented (Natural) Coordinates for Generating Three-dimensional Meshes. Int. J. num. Meth. Engng., Vol. 8, pp. 27-43, 1974
- (26) Smith, D.J.L., Merryweather, H., The Use of Analytic Surfaces for the Design of Centrifugal Impellers by Computer Graphics. Int. J. num. Meth. Engng., Vol. 7, pp. 137-154, 1973
- (27) _____, DEM - Deformationsmethode mit finiten Elementen, Programmbeschreibung, interner VFW-Bericht, August 1971

- (28) Fleßner, H., Nachweis der Biegefestigkeit von bewährten Betonträgern mit digitalen Rechenautomaten.
Dr. Ing. Dissertation, Hannover 1966
- (29) Fleßner, H., Ein Beitrag zur Ermittlung von Querschnittswerten mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen.
Der Bauingenieur, 37. Jahrgang Heft 4, S. 146-149, 1962
- (30) Collins, R.J., Bandwidth Reduction by Automatic Renumbering
Int. J. num. Meth. Engng., Vol. 6, pp. 345-356, 1973

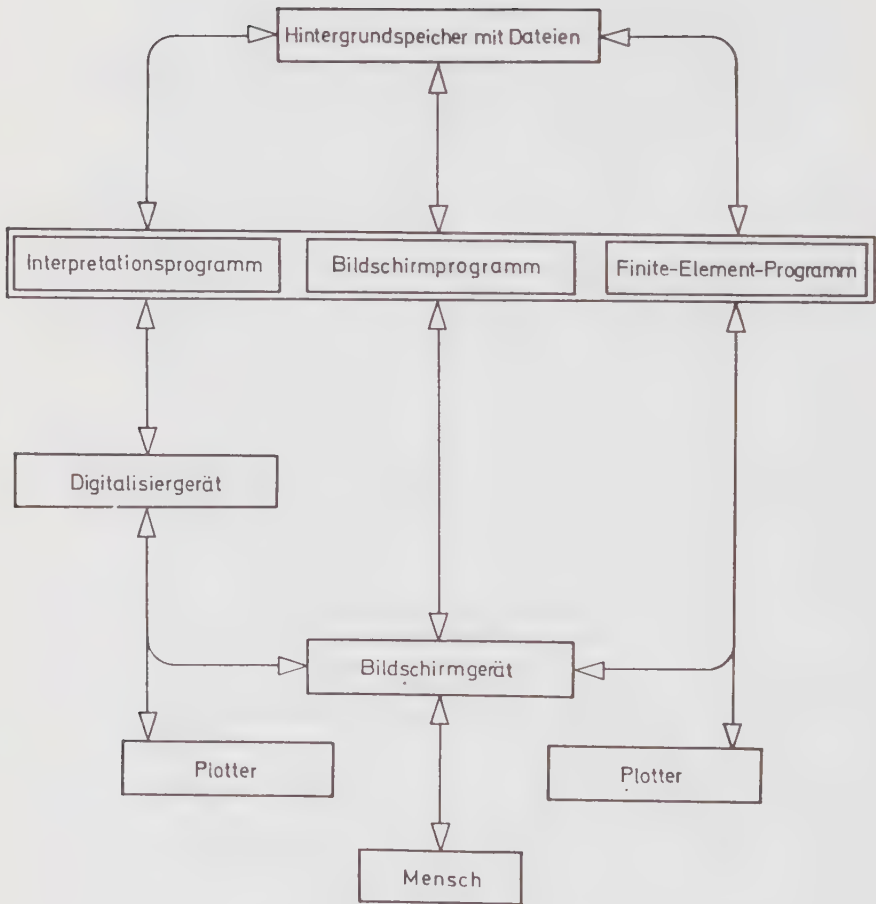


Abb.1 Dialogfähiges Gesamtsystem

(on line Betrieb)

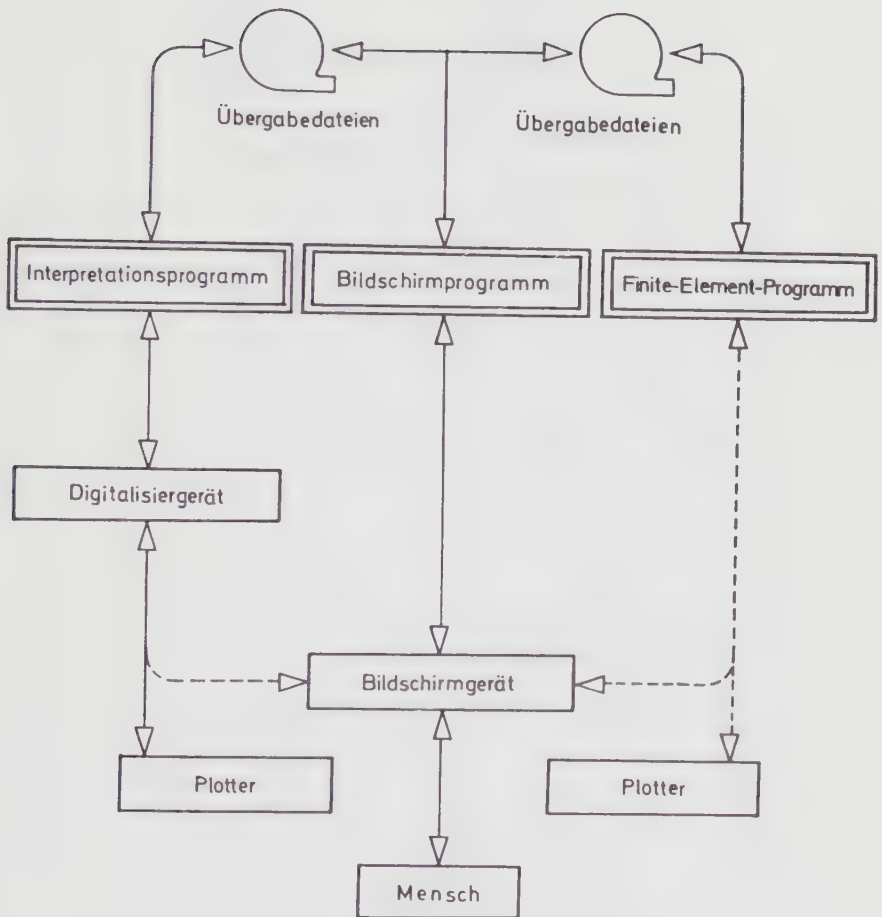


Abb.2 Dialogfähiges Gesamtsystem

(off line Betrieb)

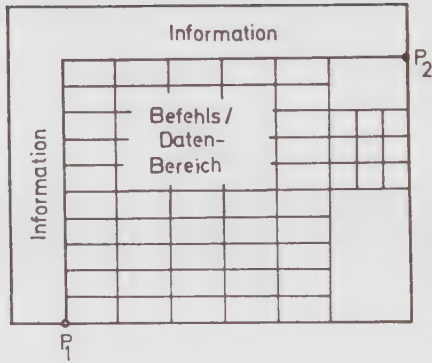


Abb.3 Menüfeld für Digitalisiergeräte

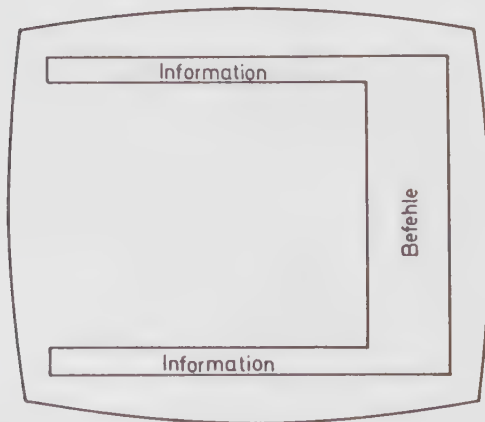


Abb.4 Bildschirm mit Menüfeld

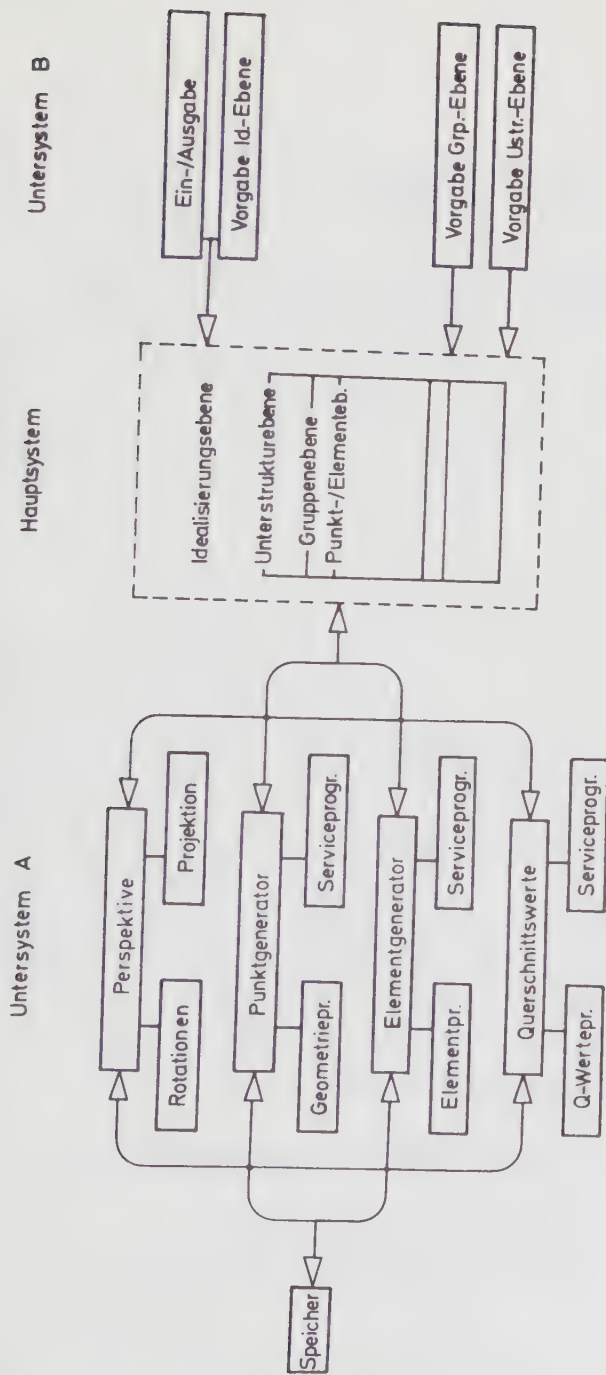


Abb. 5 Blockdiagramm des interaktiven Bildschirmprogrammes

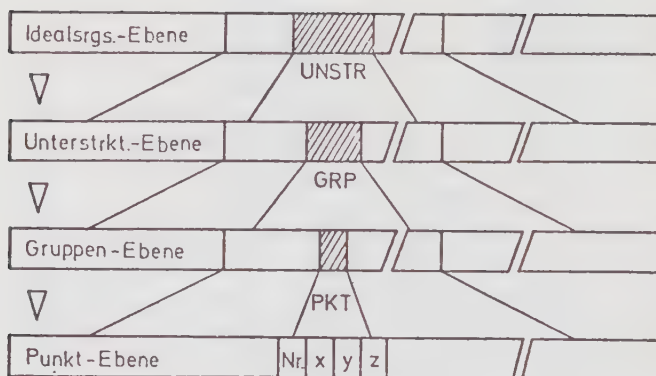


Abb. 6 a Eingabedaten (Basispunkte, Querschnittswerte)

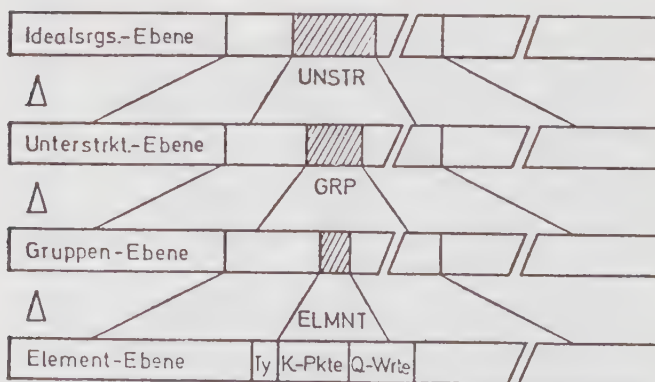
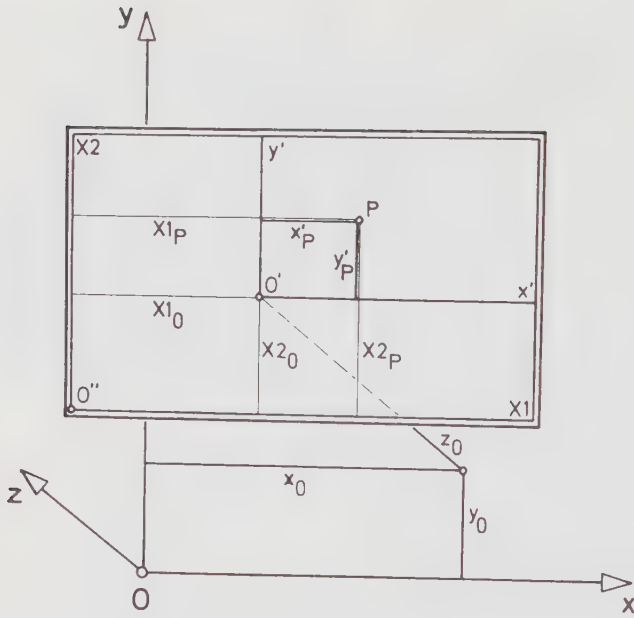


Abb. 6 b Ausgabedaten (generierte Punkte, Elemente)

Abb.6 Hierarchie der Ein-/Ausgabedaten

Koordinaten für Finite-Element-Rechnungen									
Definition der Abtast- ebene	STRD	X1	$\rightarrow x$	$\rightarrow y$	$\rightarrow z$	$\rightarrow -x$	$\rightarrow -y$	$\rightarrow -z$	
	X1 $\Rightarrow$ x								
	X2 $\Rightarrow$ y	X2	$\rightarrow x$	$\rightarrow y$	$\rightarrow z$	$\rightarrow -x$	$\rightarrow -y$	$\rightarrow -z$	I-I E ZL
		X-CON	Y-CON	Z-CON				Z-DEF	7 8 9
									4 5 6
Ursprung	STRD	X0	Y0	Z0	DGINT	SET0		Z-DEF	1 2 3
Maßstab	MX1	MX2	MCON					I-DEF	0 ZE
Korrektur	Korrektur	Korrektur							
konst.Koord.	XICON	X2CON	XIREF	X2REF				ENDC	
Koord.-Ausgl.	GRD1	GRD2	PRB1	PRBN				ENDA	
Sym.-linien	X1	X2	XB	YB	SLP2	SP		ENDS	
Sym.-ebene	x-y	y-z	z-x					ENDS	
Punktnr.	NDEF	NALT	PNR=1					I-DEF	
Untertlg.	GRP	UNSTR		IDSRG					
Betriebsart	ONL	OFFL							
Steuerung				ENDD	DISP	PLOT	COMP		

Abb.7 Menüfeld mit Befehlspositionen



$$\mathcal{U}_{P_{D.G.}} = \begin{bmatrix} X_{1P} \\ X_{2P} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{U}_{D.G._0} = \begin{bmatrix} X_{10} \\ X_{20} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{U}_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}, \quad \mathcal{U}'_P = \mathcal{U}_{P_{D.G.}} - \mathcal{U}_{D.G._0}$$

$$\mathcal{U}_P = Z \mathcal{U}'_P + \mathcal{U}_0$$

Abb. 8 Abtastebene mit Koordinatensystemen

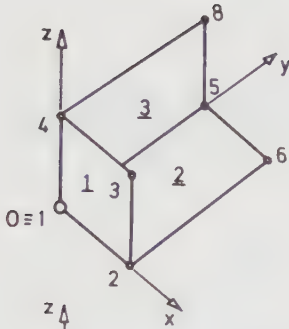
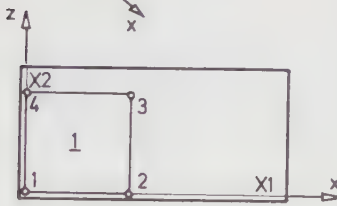
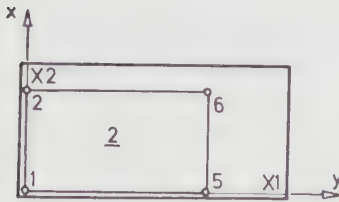


Abb. 9 a



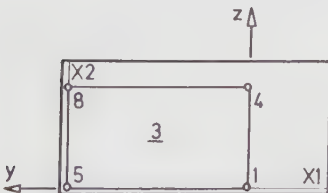
$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Abb. 9 b



$$Z = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

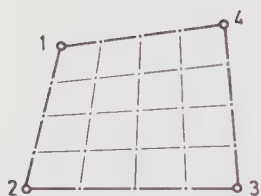
Abb. 9 c



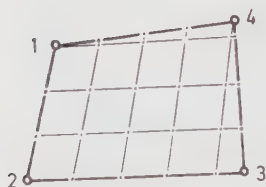
$$Z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Abb. 9 d

Abb. 9 Digitalisieren von Teilflächen



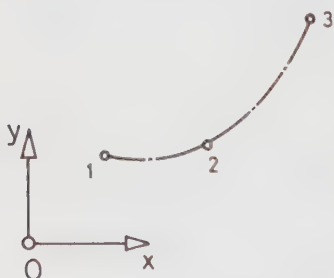
Bereich mit 4 Randpunkten
Schnitt von 2 Geradenscharen



Bereich mit 4 Randpunkten
Schnitt von 2 Parallelscharen



Bereich mit 2 Randpunkten
äquidistante Unterteilung



Bereich mit 3 Randpunkten
Parabel 2. Ordnung

Abb.10 Standard-Geometriebereiche

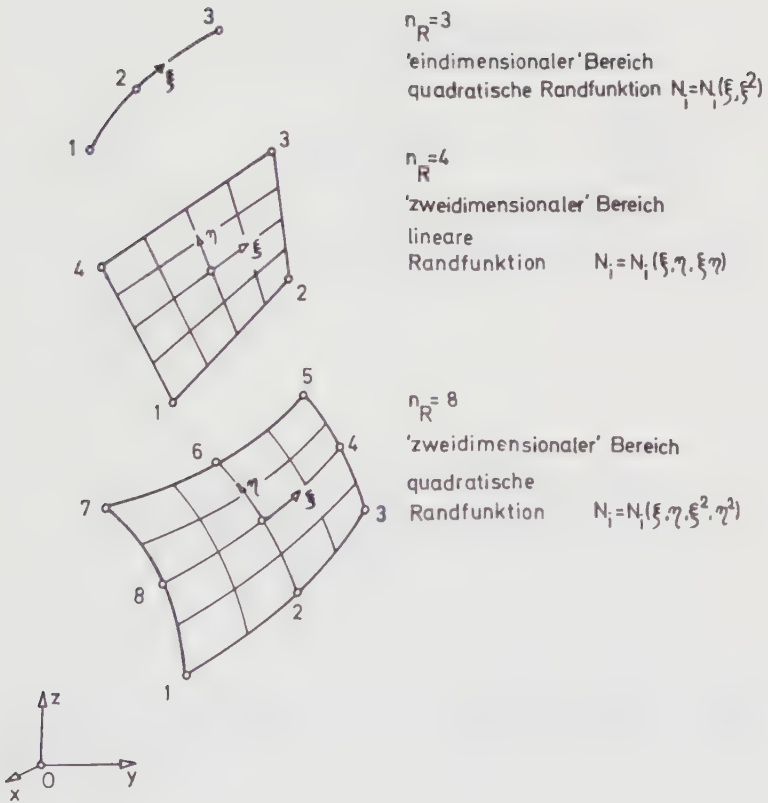


Abb.11 Isoparametrische Geometriebereiche

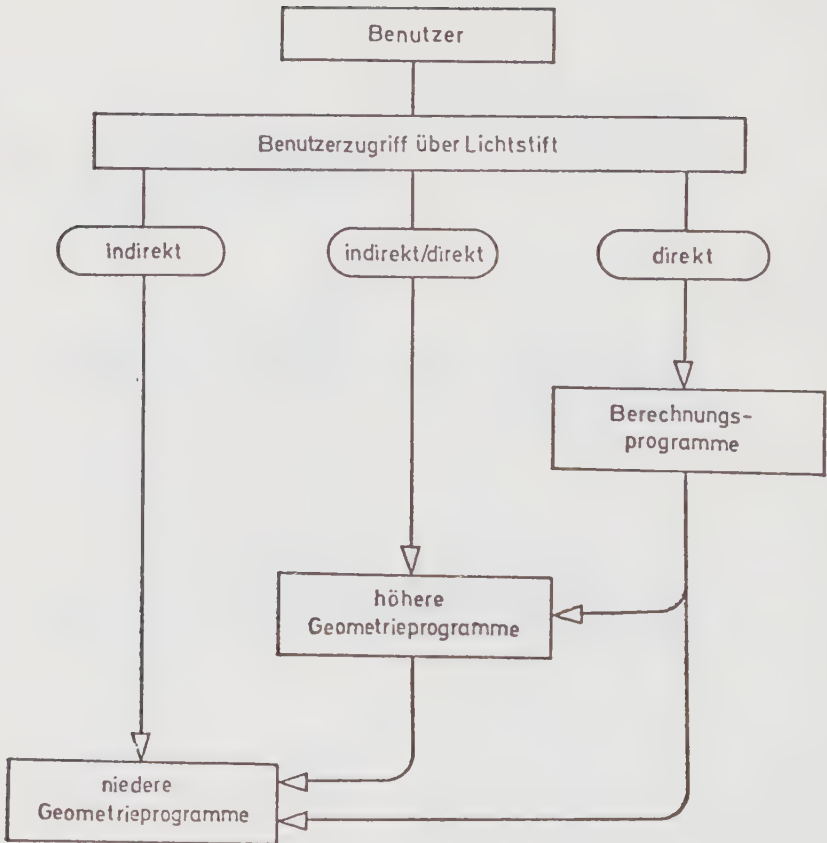
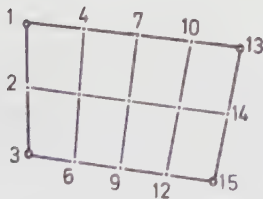


Abb.12 Hierarchie der Geometrieprogramme



Viereckbereich
mit Vorgabepunkten



Viereckbereich
mit generierten Punkten



Abb.13 Organisation der Punktnummern

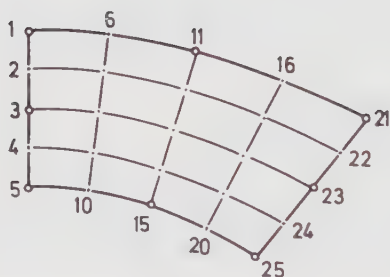


Abb. 14 a

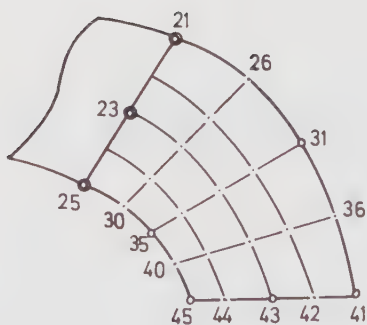
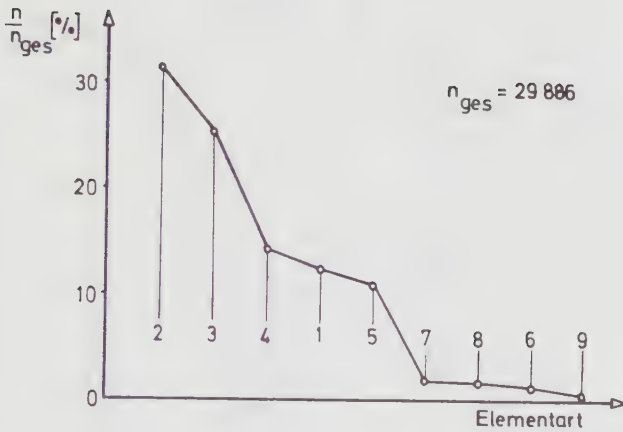


Abb. 14 b

Abb.14 Zur Numerierung neuer Knotenpunkte



Elementart	Typnr.	n_{El}	%
Biegeelement	2	9321	31,18
Stabelement	3	7741	25,90
Rechteckscheibenelement	4	4230	14,15
Dreieckscheibenelement	1	3695	12,30
Viereckscheibenelement	5	3256	10,89
Rechteckplattelement	7	536	1,79
Biegeelement mit Gelenk	8	507	1,69
Dreieckplattelement	6	381	1,27
Holmelement	9	219	0,73

Abb.15 FEM-Statistik

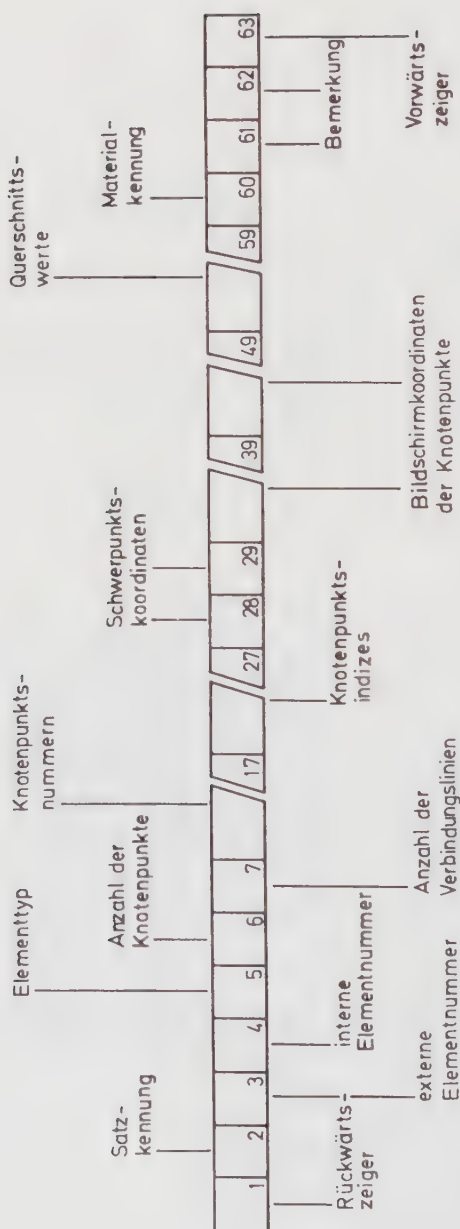
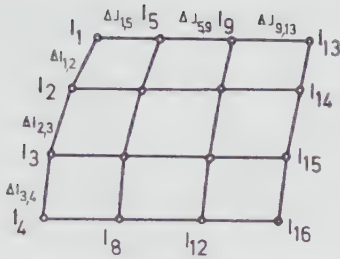


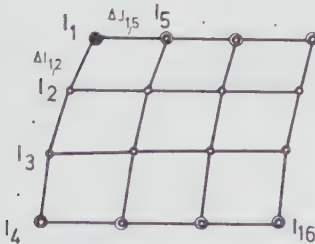
Abb.16 Struktur eines 'Elementsatzes'



-AUTOMAT-

I_1	I_5	I_9	I_{13}
I_2	I_6	I_{10}	I_{14}
I_3	I_7	I_{11}	I_{15}
I_4	I_8	I_{12}	I_{16}

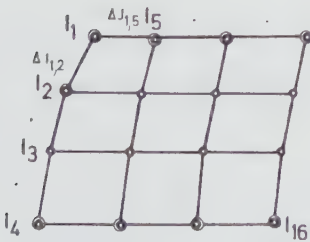
Abb.17 a Beliebige Indextdifferenzen ΔI_{ij} und ΔJ_{ij}
(alle Punkte aktiviert)



-REGELM1-

I_1	I_5	I_9	I_{13}
	berechnet		
I_4	I_8	I_{12}	I_{16}

Abb.17 b Indextdifferenzen $\Delta I_{ij}=1$, ΔJ_{ij} beliebig
(nur $\odot$ -Punkte aktiviert)



-REGELM2-

I_1	I_5	I_9	I_{13}
I_2	berechnet		
I_4	I_8	I_{12}	I_{16}

Abb. 17 c Indextdifferenzen $\Delta I_{ij}=n$, ΔJ_{ij} beliebig
(nur $\odot$ -Punkte aktiviert)

Abb.17 Halbautomatische Elementgenerierung

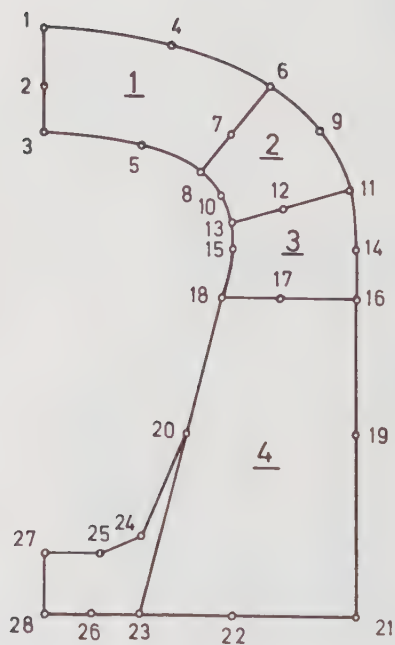


Abb.18 Basisgeometrie Heißbauge

DIE HIER GEWÄHLTEN ARBEITEN KÖNNEN NACH JEDER GRUPPE GEÄNDERT WERDEN		SISYS4	
MOEGLICH		GEWÄHLT	
ZWISCHENPUNKTE BERECHNEN	JA	ZWISCHENPUNKTE BERECHNEN	
NUR ELEMENTE DARSTELLEN	JA		
NUR 0-WERTE ZUWEISEN	JA		
STANDARDEVGABE		JA	
STRAEGER & KARTEN / MSAIC		KARTEN:	
EVGVORABE		IST DIESE VORGABE KORREKT	
		JA NEIN	
		ACTIVE	

Abb. 19 Heißauge
Arbeitsvorgabe

ROTAT: ROTX = 1.00

0.00

0.00

PKTNR.

DISYS:

ROTX
ROTY
ROTE

BEURTLG.D. PERSPEKT.

VERSX
VERSY
VERSZ
ZIN
ZINTE

AUTORE
REPROG
PARALP
ENDVORG

NET
NET

CHTYGR
ORIGIN

DELTA
DELTA
ALTEX

PSYMBOL
PSYMBOL

ENDVORG
ACTIVE

Abb. 20 HeiBauge
Perspektive



Abb. 21 Heibaug

Generierte Punkte



Abb. 22 Heißbaue
Punktgenerierung



Abb. 23 Heißbaue

Fertiges Punktnetz

VIERECK

ELMZL 2 36

KEINE

DISYST

DREIECK

BIEGE

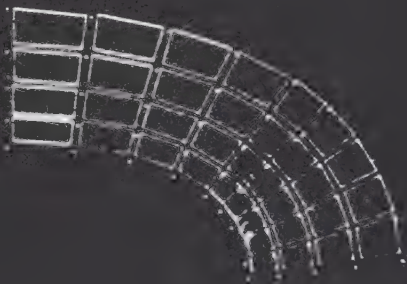
STAB

RECHTECK

VIERECK

DREIPLA

RECHPLA



DUMMVEL

AUTOMAT

REGELN:

REGELN2

FIX

FIXEND

DEFINE

DEFORRT

MANUAL

KEINE

LOESHEI

TOTALE

SECTION

NEUPERS

NEUPKT

PSYBOL

PKTHR.

STANZEN

REPROD

STRDFAK

NEUFAR

ENDOPLY

ACTIVE

Abb. 24 Heißbauge

Halbautomatisch

generierte Elemente

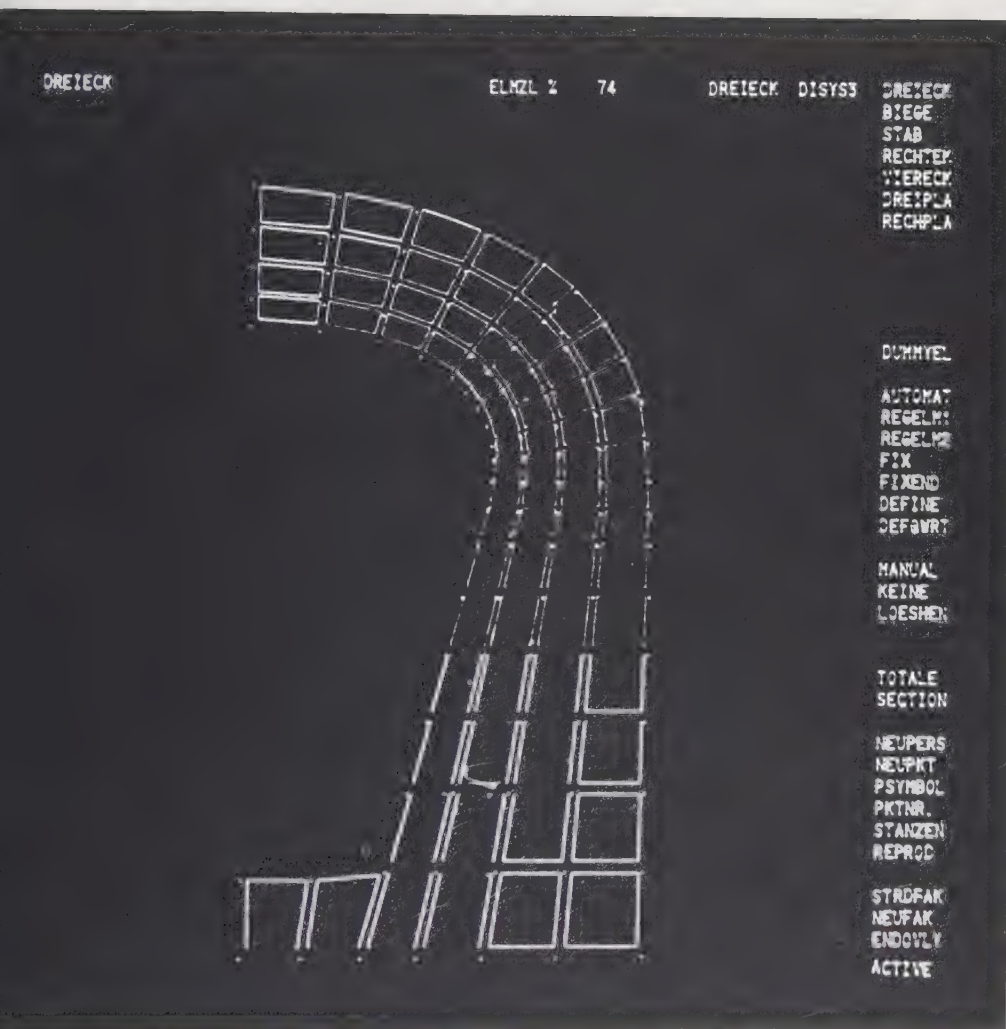


Abb. 25 HeiBauge
Elementnetz

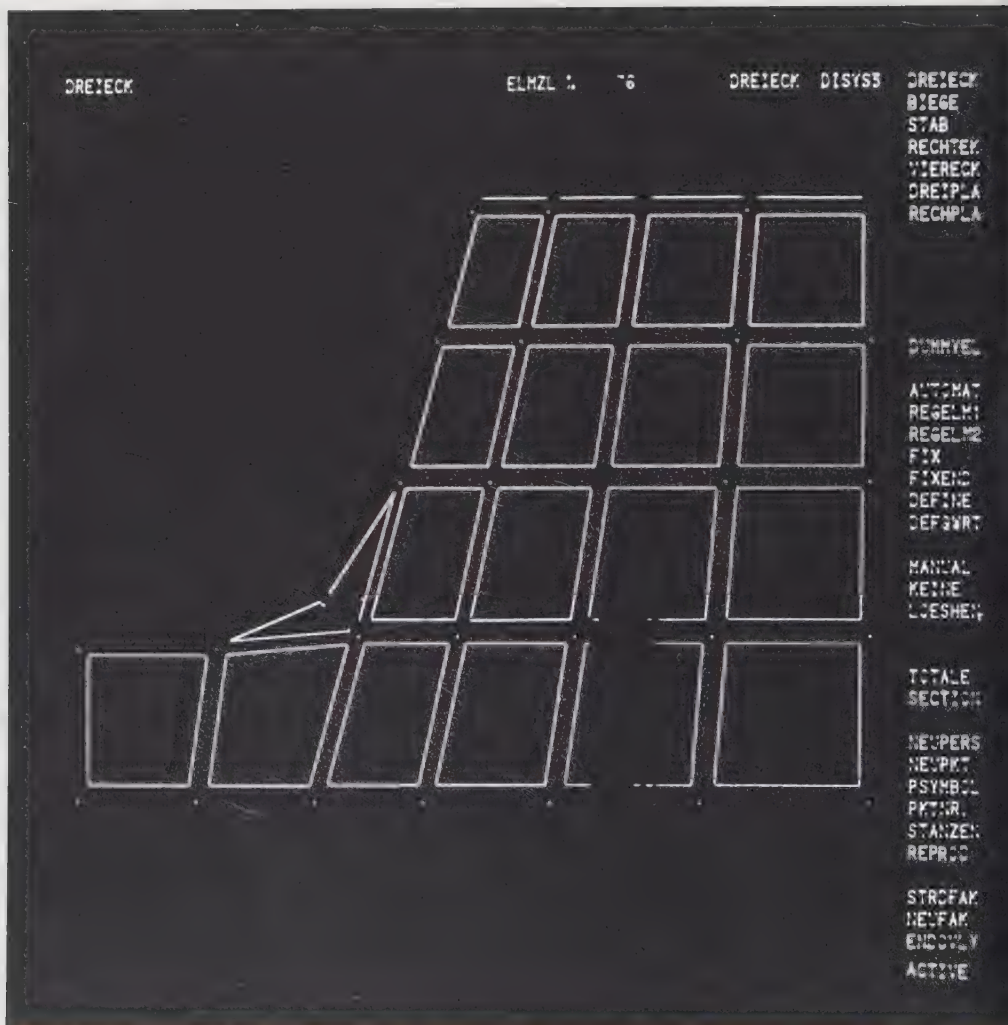


Abb. 26 Heißbauge

Detailansicht

REPROD

ELMZL 2 76

DISYSS DREIECK
BIEGE
STAB
RECHTEX
VIERECK
DREIPLA
RECHPLA



DUMMYEL

AUTOMAT
REGELM1
REGELM2
FIX
FIXEND
DEFINE
DEFMRT

MANUAL
KEINE
LOESHEN

TOTALE
SECTION

NEUPERS
NEUPKT
PSYMBOL
PKTNR.
STANZEN
REPROD

STROFAK
NEUFAK
ENDOVLY
ACTIVE

Abb. 28 Heißbaue

Fertige Idealisierung

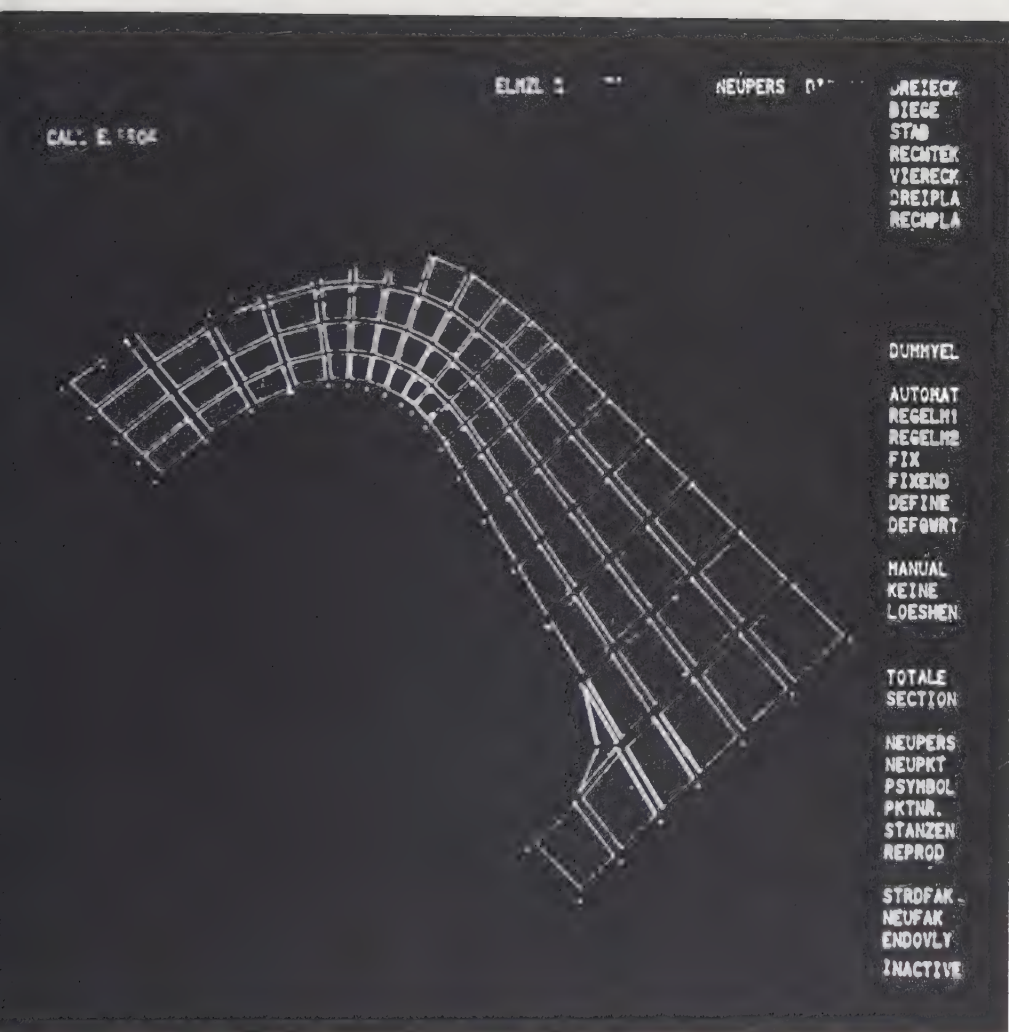


Abb. 29 Heibaug

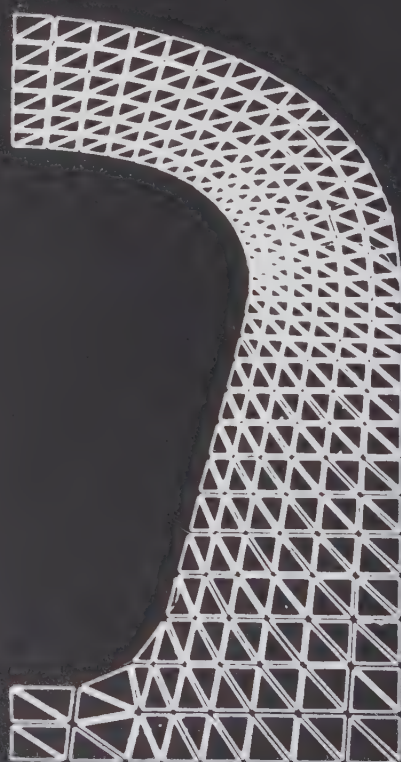
Andere Perspektive

HEPROG

ELMZL

468

DISYSS DREIECK
BIEGE
STAB
RECHTEK
VIERECK
DREIPLA
RECHPLA



DUMMYEL

AUTOMAT
REGELMI
REGELM2
FIX
FIXEND
DEFINE
DEFOWRT

MANJAL
KEINE
LOESHEN

TOTALE
SECTION

NEUPERS
NEUPKT
PSYMBOL
PKTNR
STANZEN
HEPROG

STROFAK
NEUFAR
ENDOVLT
ACTIVE

Abb. 30 Heißbauge

Alternatividealisierung



Abb. 31 Heißauge
Querschnittswerte

WIERECK +

LICHTSTIFT-AKTION



ELNRN. DISYS6

DREIECK
BIEGE
STAB
RECHTEN
WIERECK
DREIPLA
RECHPLA

ENDELT

ELTYPER

IDENTEL

CHGRT
STANDRO
MAITAL
KEINE
LOESHEN
ELVEISE
ELSERIE

TOTALE
SECTION
ALMENTE
NEUPERS

PSYMBOL
PKTRN.
STANZEN
REPROD
ELNRN.

ENDELT
ACTIVE

Abb. 32 Heißbaue

Zuweisen der
Querschnittswerte

DISK!!!

VORGABE FÜR ALTE GRUPPEN

JA

VORGABE FÜR NEUE GRUPPEN

JA

OHNE NEUE WAHL WEITER

NÄCHSTE GRUPPE

JA

NÄCHSTE SUBSTRUKTUR

JA

NÄCHSTE IDEALISIERUNG

JA

NÄCHSTE IDEALISIERUNG

ENDE

JA

IST DIESE VORGABE KORREKT

JA

NEIN

ACTIVE

Abb. 33 Arbeitsvorgabe

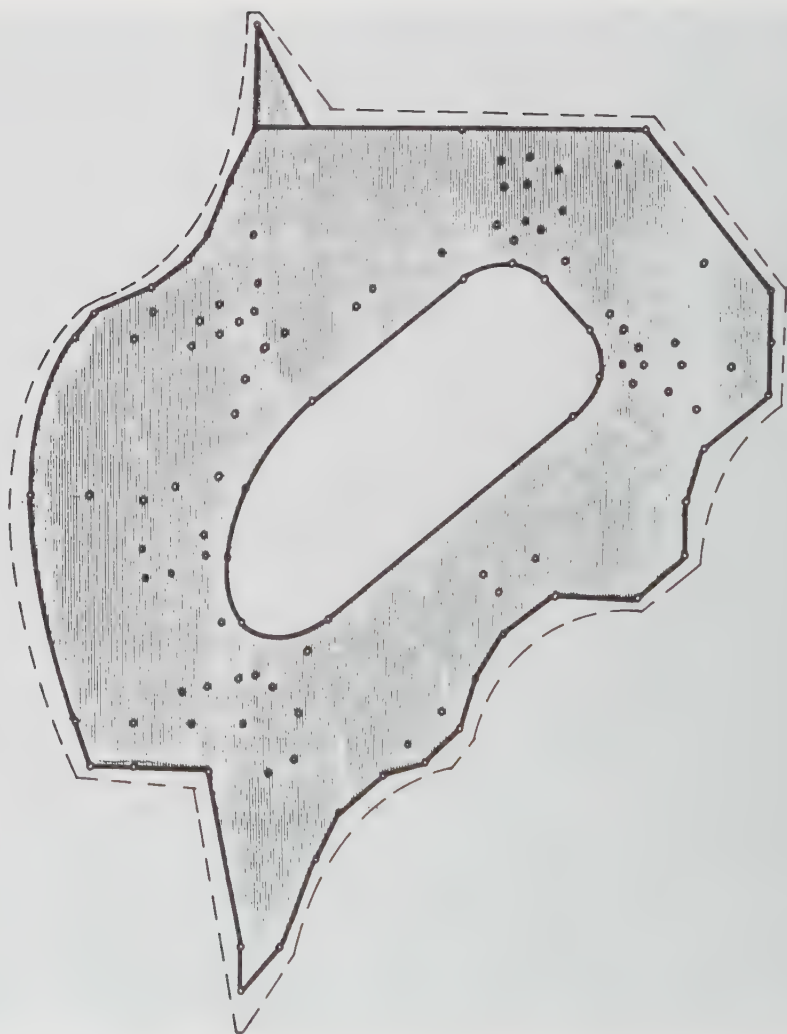


Abb. 34 Teilstruktur mit Handloch

Basisgeometrie



Abb. 35 Teilstruktur
Basisgeometrie



Abb. 40 Teilstruktur

Fertiges Punktnetz



Abb. 41 Teilstruktur

Modifiziertes Punktnetz



Abb. 42 Teilstruktur

Detailansicht

Elementgenerierung



Abb. 44 Teilstruktur

Elementblock

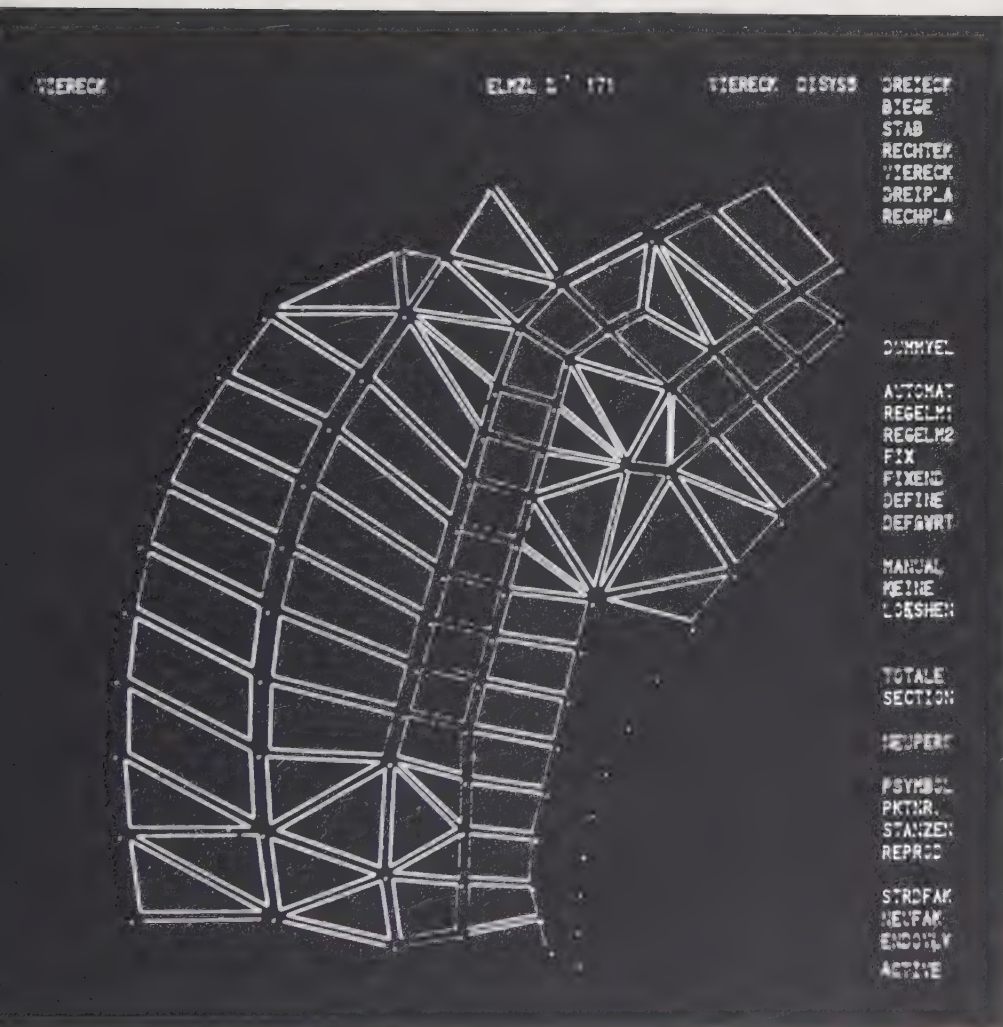


Abb. 45 Teilstruktur

Detailansicht

Elementgenerierung



Abb. 46 Teilstruktur

Generierungsphase

TOTALE

ELM2L 1 439

DISYS

DREIECK
BIEGE
STAB
RECHTEN
VIERECK
DREIPLA
RECHPLA



CONVE

AUTOMAT
REGELM1
REGELM2
FIX
FIXEND
DEFINE
DEFQVRT

HANUAL
KEINE
LOESHEI

TOTALE
SECTION

NEUPERS

SYMBOL
PKTNR.
STANZER
REPROC

STROFAK
NEUFAR
ENDONLY
ACTIVE

Abb. 47 Teilstruktur

Gesamtansicht



Abb. 48 Teilstruktur

Fertiges Elementnetz

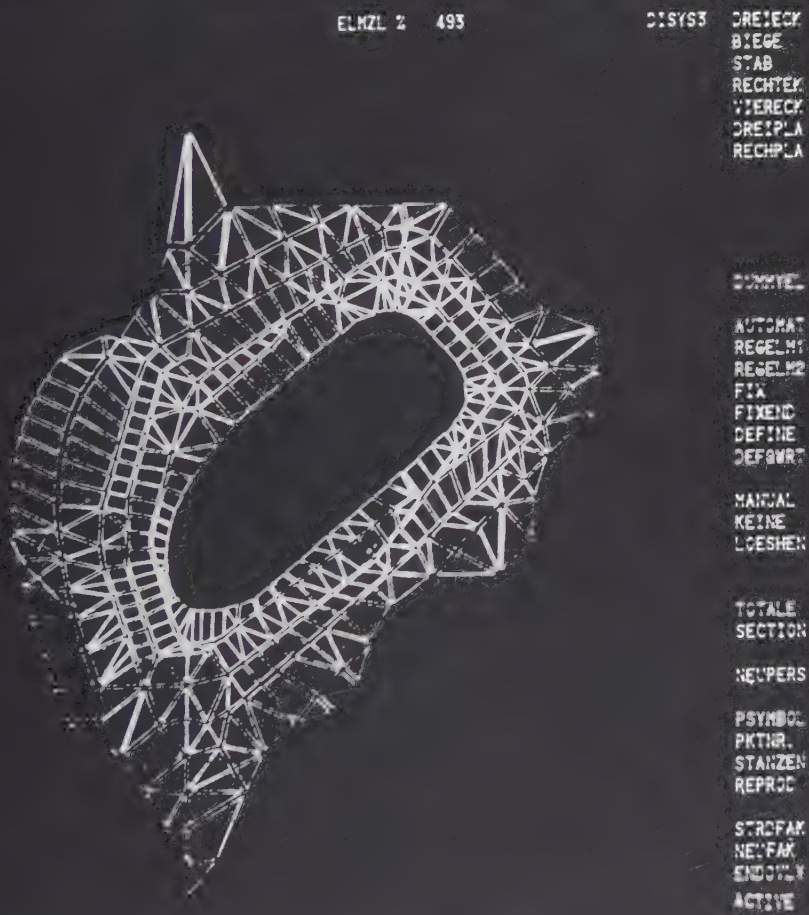


Abb. 49 Teilstruktur
Netz ohne Punkte

ROTAT: ROTX = 180.00

0.00

0.00

PKTR: 21545

ROTX

ROTY

ROTZ

NO. RTU. 0. PERSPEKT.

-019

VERSX

VERSY

VERSZ

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

ZMITTE

Abb. 50 Teilstruktur

Punktindizes vor Umordnung

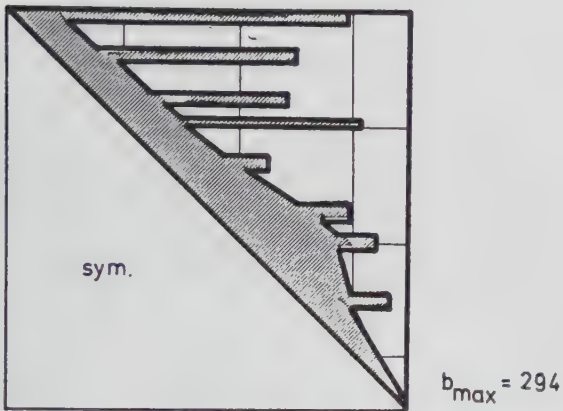


Abb. 51a Originalanordnung der Punkte

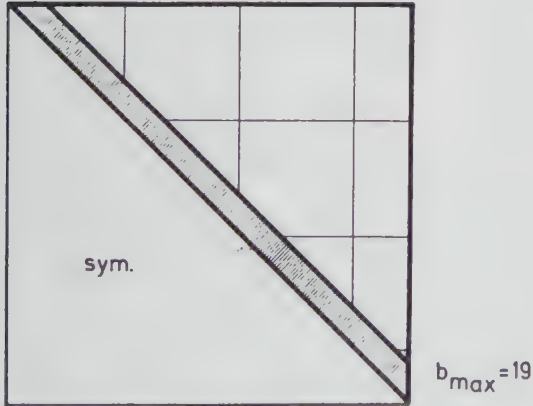


Abb. 51b Umgeordnete Punkte

Abb. 51 Teilstruktur

Optimieren der
Bandstruktur

ROT MAT: ROTX = 180.00

0.00

0.00

PKTNR.

DISYS:

ROTX

ROTY

ROTZ

BEURTLG. D. PERSPEKT.



VER SX

VER SY

VER SZ

ZNULL

ZMITTE

AUTOROT

REPROD

PARALP

ENDVORG

GUT

NEU

CHTVCOR

ORIGIN

DELTA X

DELTA Y

ALTEX

PSYMBOL

PKTNR.

ENDCYLY

ACTIVE

Abb. 52 Teilstruktur

Punktindizes nach Umordnung

Lebenslauf

Am 9. Mai 1941 wurde ich als Sohn des Landwirtes Rudolf Lehnert und seiner Ehefrau Hildegard, geb. Schmid in Braunsdorf, Kreis Jägerndorf, geboren. Nach der Übersiedlung nach Mulfingen, Kreis Künzelsau, besuchte ich die dortige Grundschule von 1947 bis 1952 und anschließend das Wagenburggymnasium in Stuttgart, wo ich im Januar 1961 die Reifeprüfung ablegte.

Nach Industriepraktikum und Bundeswehrdienstzeit begann ich im Wintersemester 1964/65 das Studium der Luftfahrttechnik an der damaligen Technischen Hochschule Stuttgart. Während des Studiums war ich als wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Statik und Dynamik und anschließend am Institut für Turboflugtriebwerke tätig. Entwurfs- und Diplomarbeit habe ich an diesen Instituten durchgeführt.

Nach Abschluß des Studiums am 28. Januar 1970 trat ich am 2. Februar 1970 als Entwicklungsingenieur in die Abteilung für Statik und Festigkeit bei den Vereinigten Flugtechnischen Werken (jetzt VFW-Fokker) in Bremen ein.

